



**isec**  
**Engenharia**

MESTRADO EM ENGENHARIA E  
GESTÃO INDUSTRIAL

**Análise Técnica e Financeira para  
Otimização da Política de Manutenção  
Condicional em uma Bobinadora de  
Papel**

Autor

**Gleidson Barroso Gurgel**

Orientador

**José Manuel Torres Farinha**

INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA

Coimbra, outubro, 2024



# isec

## Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
ELETROMECAÂNICA

### **Análise Técnica e Financeira para Otimização da Política de Manutenção Condicionada em uma Bobinadora de Papel**

Relatório de Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Autor

**Gleidson Barroso Gurgel**

Orientador

**José Manuel Torres Farinha**

Co-Orientador

**Mateus Daniel Almeida Mendes**

## AGRADECIMENTOS

Manifesto o meu profundo agradecimento à Dra. Sylvia Barroso, minha tia, cuja generosidade e apoio foram essenciais para minha mudança para Portugal e ingresso no Mestrado. Sem sua ajuda, este caminho seria inacessível.

Minha gratidão estende-se também à minha tia Marta Barroso e a todo o nosso povo, cujo apoio incondicional me fortaleceu nos momentos mais desafiadores.

Agradeço de coração a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, ajudaram-me a perseverar ao longo do curso, seja com uma palavra de suporte ou um ombro amigo. Em especial, expresso minha mais profunda gratidão aos Srs. Adão Neves, Conceição Ferreira, Manuela Ferreira, Alexandrina dos Anjos, Adelaide Lé, Luna Sposato e Fernanda Barale.

Aos colegas Rafael Figueiredo e Lígia Fernandes, cuja amizade e apoio ao longo do curso foram inestimáveis. Sou profundamente grato pela ajuda, pelo companheirismo e pelos momentos compartilhados que tornaram esta jornada ainda mais especial.

Um agradecimento especial aos Engenheiros Mário Coelho, Carlos Gonçalves e Paulo Costa, pela autorização ao acesso aos dados de pesquisa, sem os quais este estudo não teria sido possível.

Ao Engenheiro Gonçalo Cardoso, pelo apoio na obtenção de dados e rotinas de manutenção, minha profunda gratidão.

Ao Engenheiro Carlos Pedrosa, pela assistência impecável e constante disponibilidade em compartilhar seu vasto conhecimento técnico, fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos professores do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, agradeço pelos valiosos conhecimentos transmitidos ao longo do Mestrado.

Ao Dr. Mateus Daniel Mendes, pelos *insights* e provocações que tanto enriqueceram este trabalho.

Finalmente, ao Dr. José Torres Farinha, cuja orientação e sabedoria guiaram-me durante este trabalho, expresso meu sincero agradecimento por todo o apoio e dedicação.

## RESUMO

Este estudo investiga a aplicação de um sistema de manutenção condicionada em uma bobinadora de papel, utilizando monitoramento de vibração e análise de dados para prever a Vida Útil Remanescente (RUL) do equipamento. O trabalho revisa a evolução das práticas de manutenção, da abordagem reativa às estratégias proativas, como a manutenção baseada na condição (CBM). O estudo de caso foca na implementação dessas técnicas, desde a coleta e processamento de dados até o desenvolvimento de algoritmos de prognóstico com Machine Learning. No entanto, limitações como a insuficiência de dados e infraestrutura inadequada dificultaram a implementação completa do sistema. A análise financeira, baseada no *Life Cycle Cost* (LCC), avalia os cenários de impacto econômico, demonstrando que a manutenção condicionada pode ser financeiramente vantajosa, mas depende de investimentos iniciais significativos. Apesar dos desafios, o estudo conclui que a CBM é uma estratégia promissora, exigindo melhorias em dados e estrutura organizacional para sua aplicação eficaz.

**Palavras-Chave:** Manutenção Condicionada, Vida Útil Remanescente, Monitorização de Vibração, Indústria Papeleira, Prognóstico, *Machine Learning*, Análise Financeira, *Life Cycle Cost*.

## ABSTRACT

This study investigates the application of a condition-based maintenance (CBM) system on a paper winder, using vibration monitoring and data analysis to predict the equipment's Remaining Useful Life (RUL). The work reviews the evolution of maintenance practices, from reactive approaches to more proactive strategies such as CBM. The case study focuses on the implementation of these techniques, from data collection and processing to the development of prognostic algorithms using Machine Learning. However, limitations such as insufficient data and inadequate infrastructure hindered the full implementation of the system. The financial analysis, based on Life Cycle Cost (LCC), evaluates the economic impact scenarios, showing that condition-based maintenance can be financially advantageous but requires significant initial investments. Despite the challenges, the study concludes that CBM is a promising strategy, requiring improvements in data and organizational infrastructure for effective application.

**Palavras-Chave:** Condition-Based Maintenance, Remaining Useful Life, Vibration Monitoring, Paper Industry, Prognostics, Machine Learning, Financial Analysis, Life Cycle Cost.



## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE .....	1
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
ÍNDICE DE QUADROS .....	5
SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS.....	6
1 INTRODUÇÃO .....	8
1.1 Objetivos .....	8
1.1.1 Objetivo Geral.....	8
1.1.2 Objetivos Específicos:.....	8
1.2 Metodologia .....	9
1.3 Estrutura do Relatório .....	9
2 MANUTENÇÃO.....	11
2.1 Definição.....	11
2.2 História.....	12
2.2.1 Primeira Revolução Industrial: Manutenção Reativa .....	12
2.2.2 Segunda Revolução Industrial: Manutenção Preventiva.....	12
2.2.3 Terceira Revolução Industrial, Indústria 3.0: Manutenção Proativa .....	13
2.2.4 Quarta Revolução Industrial, Indústria 4.0: Manutenção Condicionada	
14	
3 MANUTENÇÃO CONDICIONADA.....	16
3.1 Obtenção de Dados .....	17
3.2 Monitorização de Condição.....	18
3.2.1 Monitorização de Vibração .....	19
3.2.2 Monitorização Sonora .....	19
3.2.3 Tribologia – Monitorização de Lubrificação e Partículas de Desgaste .....	20
3.2.4 Inspeção Visual.....	20
3.2.5 Outros tipos de Monitorização .....	21
3.3 Processamento de Dados.....	21
3.3.1 Análise de Dados do Tipo Valor.....	22
3.3.2 Análise de Dados de Formas de Onda .....	22
3.3.3 Análise Combinada de Dados de Eventos e Monitorização de Condição	
22	
3.4 Tomada de Decisão .....	23
3.5 Diagnóstico .....	25
3.5.1 Abordagens Estatísticas .....	25
3.5.2 Abordagens de Inteligência Artificial .....	25
3.5.3 Modelos Físicos .....	26
3.5.4 Abordagens Híbridas .....	26
3.6 Prognóstico e Vida Útil Remanescente (RUL) .....	26
3.7 Desafios .....	28
4 JUSTIFICAÇÃO FINANCEIRA DA CBM.....	30
4.1 Manutenção e os <i>Life Cycle Costs</i> .....	31
4.2 Custos de aquisição, depreciação, vida útil e valor residual .....	32

4.3	Encargos de pessoal.....	33
4.4	Avaliação de projetos de investimento.....	34
4.4.1	Fluxos de caixa.....	34
4.4.2	Taxa de Juro e Taxa Mínima de Atratividade (TMA).....	35
4.4.3	Valor Atual Líquido (VAL).....	35
4.4.4	Taxa Interna de Rentabilidade (TIR).....	36
4.4.5	Período de Recuperação do Investimento (PRI).....	36
5	INDÚSTRIA PAPELEIRA E CORTE DE PAPEL.....	38
5.1	Fabricação de Papel.....	38
5.1.1	Preparação da Matéria-Prima.....	40
5.1.2	Formação da Folha.....	40
5.1.3	Prensagem.....	40
5.1.4	Secagem.....	41
5.1.5	Acabamento.....	41
5.2	Corte de Bobinas.....	41
5.2.1	Processo de Corte de Papel.....	42
5.2.2	Tipos de Bobinadoras.....	44
6	ESTUDO DE CASO.....	46
6.1	Sobre a Empresa.....	46
6.2	Sobre o Equipamento.....	46
6.3	Rotina de Manutenção.....	48
6.3.1	Inspeção Visual e Sonora.....	49
6.3.2	Aquisição de Dados.....	49
6.3.3	Análise de Dados.....	50
6.3.4	Tomada de Decisão.....	51
6.4	Ações de Monitorização.....	52
6.4.1	Deteção de Problema.....	53
6.4.2	Avaliação da Gravidade e Criticidade.....	53
6.4.3	Lista de Vigilância e Monitorização Rigorosa.....	54
6.4.4	Nota de Avaria.....	55
6.4.5	Operação de Manutenção.....	55
6.5	Dados de Manutenção.....	55
6.5.1	Gestão dos Dados.....	55
6.5.2	Base de Dados.....	56
6.6	Conclusões Iniciais.....	58
6.7	Recomendações.....	59
6.7.1	Aumento na Frequência de Recolha de Dados.....	60
6.7.2	Integração de Dados.....	60
6.7.3	Melhoria Geral na Qualidade dos Dados.....	61
6.7.4	Revisão na Infraestrutura de Dados.....	61
6.7.5	Utilização de Técnicas de <i>Machine Learning</i> .....	62
7	ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA.....	63
7.1	Premissas.....	64
7.1.1	AC: custo de aquisição, vida útil, depreciação.....	64
7.1.2	Custos de operação (OC), Custo de Suporte (SC) e Custo de Indisponibilidade (UC).....	65
7.1.3	Encargos com Pessoal (SC).....	66
7.1.4	Comentários adicionais.....	69
7.2	Cenário 1: Positivo.....	70
7.2.1	Fluxo de caixa.....	71
7.2.2	Valor atual líquido (VAL).....	71

7.2.3	Taxa Interna de Rentabilidade (TIR).....	72
7.2.4	Período de Recuperação do Investimento (PRI).....	72
7.3	Cenário 2: Negativo .....	73
7.3.1	Fluxo de caixa.....	74
7.3.2	Valor Atual Líquido (VAL) .....	74
7.3.3	Taxa Interna de Rentabilidade (TIR).....	75
7.3.4	Período de Recuperação do Investimento (PRI).....	75
7.4	Comparação de Cenários .....	76
8	DISCUSSÃO .....	79
8.1	Análise dos Objetivos.....	79
8.2	Contribuições para a ciência.....	80
8.3	Limitações do Estudo .....	81
9	CONCLUSÃO E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	82
9.1	Conclusão .....	82
9.2	Trabalhos Futuros .....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84
10	ANEXOS.....	90
10.1	Anexo 1: Lista de Vigilância .....	91
10.2	Anexo 2: Codificação dos Sensores de Vibração .....	92
10.3	Anexo 3: Folha Estatística .....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Processo CBM simplificado [8].....	17
Figura 3.2 – Curva P-F [30].....	23
Figura 3.3 – Principais Etapas entre Prognóstico e Diagnóstico [28].....	24
Figura 5.1 – Vista de uma linha de fabricação de papel de alta capacidade.....	39
Figura 5.2 – Seções de uma máquina de papel para produção de jornais [46].....	39
Figura 5.3 – Vistas de uma bobinadora de papel a) aérea e b) frontal, na estação de descarregamento de bobinas [52].....	42
Figura 5.4 – Representação do processo de corte de papel em uma bobinadora, adaptada com a indicação numérica de cada etapa [51].....	43
Figura 5.5 – Diferentes bobinadoras a) Clássica de dois tambores, b) com suporte de ar e c) de tambor único, adaptadas com a indicação numérica de cada estação [47].....	45
Figura 6.1 – Desenho esquemático de uma bobinadora de dois tambores.....	47
Figura 6.2 – Etapas da rotina de manutenção da bobinadora.....	48
Figura 6.3 - Medidas de vibração efetuadas em: a) um motor elétrico; e b) uma caixa redutora.....	50
Figura 6.4 - Visualização de um padrão vibratório com presença de falha.....	51
Figura 6.5 - Localização de parafuso desapertado.....	51
Figura 6.6 - Ações de monitorização.....	53
Figura 7.1 - Comparativo de Cenários.....	77

## ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 4.1 – Impacto da Manutenção Preditiva em Diversos Setores Industriais [18]	30
Tabela 6.1 – Descritivo dos equipamentos indicados na Figura 6.1	47
Tabela 7.1 – Custos do Equipamento – pt. 1	65
Tabela 7.2 – Custos do Equipamento – pt. 2	66
Tabela 7.3 – Custos de Pessoal	68
Tabela 7.4 – Custos do Equipamento – pt. 3	69
Tabela 7.5 – LCC	69
Tabela 7.6 – Comparativo de Cenários	70
Tabela 7.7 – Estimativa de Custos – Cenário Positivo	71
Tabela 7.8 – Fluxo de Caixa – Cenário Positivo	71
Tabela 7.9 – Estimativa de Custos – Cenário Negativo	74
Tabela 7.10 – Fluxo de Caixa – Cenário Negativo	74
Tabela 7.11 – Comparativo de Cenários	78

## **SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS**

ANN - Artificial Neural Network (Rede Neural Artificial)

APM - Asset Performance Management (Gestão de Desempenho de Ativos)

AR - Auto Regressive (Modelo Autorregressivo)

ARMA - Auto Regressive Moving Average (Modelo Autorregressivo de Média Móvel)

AV - Axial Velocidade (Velocidade Axial)

BP - British Petroleum

BP - Backpropagation (Retropropagação)

CBM - Condition Based Maintenance (Manutenção Baseada na Condição)

CCNN - Correlation Cascade Neural Networks (Redes de Correlação em Cascata)

CM - Condition Monitoring (Monitorização de Condição)

CRISP - Cross-Industry Standard Process for Data Mining (Processo Padrão Interindustrial para Mineração de Dados)

DE - Lado Acionamento (Drive End)

ERP - Enterprise Resource Planning (Planejamento de Recursos Empresariais)

ES - Expert Systems (Sistemas Especialistas)

FFT - Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)

FMEA - Failure Modes and Effects Analysis (Análise dos Modos de Falha e Efeitos)

GE - General Electric

GM - General Motors

HF - Alta Frequência (High Frequency)

HR - Alta Resolução (High Resolution)

IA - Inteligência Artificial

ICA - Independent Component Analysis (Análise de Componentes Independentes)

IMx - Interactive Measurement eXperience (Experiência de Medição Interativa)

IoT - Internet of Things (Internet das Coisas)

IP - Entrada (Inlet)

LCC - Life Cycle Cost (Custo do Ciclo de Vida)

MP - Manutenção Preventiva

NDE - Lado Oposto ao Acionamento (Non-Drive End)

OK - Indicador de condição (Operacional/Em Boas Condições)

PCA - Principal Component Analysis (Análise de Componentes Principais)

PdM - Predictive Maintenance (Manutenção Preditiva)

PHM - Proportional Hazard Model (Modelo de Riscos Proporcionais)

PPMS - Plant Production Management System (Sistema de Gestão da Produção de Plantas)

RCM - Reliability Centred Maintenance (Manutenção Centrada na Fiabilidade)

RMS - Root Mean Square (Valor Médio Quadrático)

RUL - Remaining Useful Life (Vida Útil Remanescente)

SHM - Structural Health Monitoring (Monitorização da Saúde Estrutural)

SPC - Statistical Process Control (Controle Estatístico de Processo)

STFT - Short Time Fourier Transform (Transformada de Fourier de Curto Prazo)

SVM - Support Vector Machine (Máquina de Vetores de Suporte)

TPM - Total Productive Maintenance (Manutenção Produtiva Total)

VA - Vertical Aceleração (Aceleração Vertical)

VV - Vertical Velocidade (Velocidade Vertical)

# 1 INTRODUÇÃO

A competitividade industrial contemporânea demanda que as empresas maximizem tanto a eficiência quanto a disponibilidade de seus equipamentos críticos. Nesse contexto, a manutenção industrial se torna essencial, não só para assegurar a continuidade das operações, mas também para otimizar custos e prevenir falhas catastróficas. A abordagem reativa tradicional, que se concentrava na correção de falhas após sua ocorrência, está sendo gradualmente substituída por estratégias mais proativas e orientadas por dados, especialmente em setores onde a confiabilidade dos ativos é fundamental.

Este estudo explora a aplicação de um sistema de manutenção condicionada em uma bobinadora de papel dentro do setor papelero. A escolha deste equipamento não foi arbitrária: sua importância operacional, aliada à disponibilidade de um histórico robusto de dados de vibração, torna-o um candidato ideal para a implementação de técnicas avançadas de monitoramento e prognóstico. Ao longo do estudo, são analisadas as possibilidades de prever a Vida Útil Remanescente (RUL) do equipamento, utilizando dados históricos e técnicas de análise preditiva.

Além do aspeto técnico, o estudo aborda a viabilidade financeira da implementação do sistema de prognóstico, utilizando o *Life Cycle Cost* (LCC) como parâmetro de avaliação do impacto econômico. A análise do LCC permite quantificar os benefícios financeiros potenciais em termos de redução de custos operacionais e prolongamento da vida útil dos ativos, criando uma visão abrangente dos custos e benefícios ao longo do ciclo de vida do equipamento

A expectativa é que as práticas adotadas possam não apenas melhorar a eficiência da manutenção, mas também servir como base para o desenvolvimento de um sistema de manutenção mais abrangente e replicável em outros contextos dentro da indústria.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade e a eficácia da implementação de um algoritmo de Manutenção Condicionada (CBM) para calcular a Vida Útil Remanescente (RUL) de uma bobinadora de papel em uma empresa.

### 1.1.2 Objetivos Específicos:

1. Realizar uma revisão abrangente da literatura sobre estratégias de manutenção industrial, com ênfase nas metodologias de manutenção baseada na condição.

2. Avaliar a viabilidade técnica da implementação de um sistema de Prognóstico em uma bobinadora de papel e, caso seja viável, proceder com o desenvolvimento do mesmo.
3. Avaliar a viabilidade financeira de um projeto de implementação do Prognóstico, caso a implantação do mesmo não seja possível.

## 1.2 Metodologia

A metodologia proposta seguirá as seguintes etapas.

1. Revisão da Literatura
  - Realizar uma pesquisa aprofundada sobre estratégias de manutenção industrial, com ênfase nas metodologias de manutenção baseada em condições.
2. Recolha e Análise de Dados
  - Desenvolver um estudo de caso detalhado sobre a operação de uma bobinadora de papel, incluindo a recolha de dados históricos de manutenção e rotinas.
3. Avaliação Técnica e Financeira
  - Com base nos dados recolhidos será avaliada a viabilidade técnica da implementação de um sistema de Prognóstico no equipamento. Caso seja viável, os dados serão utilizados para selecionar o algoritmo de *Machine Learning* mais adequado, seguindo a metodologia CRISP-DM ou similar, para calcular a Vida Útil Remanescente (RUL) do equipamento.
4. Estudo de Viabilidade
  - Caso a implementação do sistema de Prognóstico não seja viável, serão propostas melhorias nos processos de manutenção. Além disso, será realizada uma análise financeira comparativa, utilizando cenários de custos e benefícios. Serão criados diferentes cenários financeiros para avaliar o impacto do projeto, com o objetivo de validar a viabilidade económica e operacional da metodologia de Prognóstico.
5. Conclusões
  - Desenvolver as conclusões finais com base nos resultados obtidos, discutindo a viabilidade técnica e financeira da implementação do sistema de Prognóstico

## 1.3 Estrutura do Relatório

O relatório está dividido nas seguintes seções.

- Capítulo 1 – Introdução: Apresenta o contexto e a importância da manutenção industrial, focando na transição para a manutenção condicionada, com um estudo de caso aplicado a uma bobinadora de papel.
- Capítulo 2 – Manutenção: Explora a evolução das práticas de manutenção, desde abordagens reativas até as modernas estratégias de manutenção condicionada, no contexto das revoluções industriais.
- Capítulo 3 – Manutenção Condicionada: Detalha a metodologia de Manutenção Condicionada (CBM), processos de monitorização, e técnicas de diagnóstico e prognóstico para otimizar a vida útil dos equipamentos.
- Capítulo 4 – Justificação Financeira da CBM: Este capítulo examina os benefícios económicos da manutenção baseada na condição, destacando as economias geradas e sua viabilidade através de indicadores financeiros, como o VAL e o TIR.
- Capítulo 5 – Indústria Papeleira e Corte de Papel: Descreve o processo de fabricação de papel, destacando o papel crítico das bobinadoras no corte e preparação final das bobinas de papel.
- Capítulo 6 – Estudo de Caso: Apresenta um estudo detalhado sobre a implementação de Manutenção Condicionada em uma bobinadora de papel, incluindo a análise das rotinas de manutenção e a viabilidade de um algoritmo de prognóstico.
- Capítulo 7 – Análise de Viabilidade Financeira: Avalia os aspetos financeiros relacionados com a implementação do Prognóstico, discutindo os custos e benefícios de diferentes cenários para a empresa.
- Capítulo 8 – Discussão: Revisa o percurso do trabalho e o impacto nos resultados, abordando o cumprimento dos objetivos, as limitações enfrentadas e as contribuições oferecidas.
- Capítulo 9 – Conclusão e Perspetivas de Trabalhos Futuros: Resume os principais desafios e propostas de melhoria para a manutenção condicionada, com foco na coleta de dados, integração de sistemas e uso de *Machine Learning* para previsão de falhas.

## 2 MANUTENÇÃO

É inevitável que máquinas, equipamentos e ferramentas de produção enfrentem desgaste e exijam manutenção [1], [2]. Na sociedade contemporânea, onde sistemas complexos fornecem bens e serviços essenciais, como transporte, comunicação, serviços públicos e cuidados de saúde [3], a falha desses equipamentos pode ter repercussões económicas, humanas e ambientais significativas [3].

Com a busca pela lucratividade, houve um investimento crescente em instalações altamente automatizadas e tecnologicamente avançadas, visando aumentar a eficiência e reduzir custos, colocando os ativos físicos no cerne da estratégia corporativa [2]. Assim, a importância da manutenção nas empresas sofreu uma grande transformação [2]: de uma atividade inicialmente vista como custosa e necessária para apoiar o ciclo de vida de um sistema [4], passou-se a reconhecer que a manutenção pode ser uma fonte de lucro, em vez de apenas um centro de custo [5], tornando-se parte integrante da estratégia de negócios da empresa para alcançar os seus objetivos [2].

Ao longo dos anos a manutenção industrial tem sido objeto de extenso estudo na literatura académica [5], explorando diversas estratégias para minimizar falhas e introduzindo novos conceitos para aprimorar as deficiências dos sistemas de manutenção anteriores [6], tendo uma evolução paralela às melhorias tecnológicas observadas nos demais campos.

Em tempos de crise financeira, queda nas receitas e aumento dos custos de energia, matéria-prima e mão de obra [1], a manutenção eficiente e eficaz é mais vital do que nunca para garantir o progresso contínuo e sustentável.

### 2.1 Definição

A norma portuguesa NP EN 13306:2007 lista a definição de manutenção como a *“Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”* [7]. Definições semelhantes, em língua estrangeira, podem ser encontradas em [4], [8].

Outra definição na literatura sobre o propósito da manutenção seria: *“...reduzir os efeitos adversos de quebras e aumentar a disponibilidade a um custo menor, para aumentar o desempenho e melhorar o nível de fiabilidade”* [9].

## 2.2 História

A manutenção, juntamente com a sua gestão, são áreas voláteis e sujeitas a constantes mudanças e evoluções [2]. É possível estabelecer um paralelo entre a evolução da manutenção e as correntes culturais, conceituais e filosóficas que predominam em cada período industrial [1]. Dessa forma, uma abordagem interessante para contar a história da manutenção envolve compará-la com as quatro Revoluções Industriais registadas [10], evidenciando-se como cada uma delas moldou práticas e estratégias de manutenção ao longo do tempo.

### 2.2.1 Primeira Revolução Industrial: Manutenção Reativa

A Primeira Revolução Industrial, que teve início na Inglaterra no século XVIII, foi um marco significativo que acarretou profundas transformações sociais, impulsionadas principalmente pelo surgimento das máquinas a vapor [10]. Esse período foi caracterizado por avanços em diversas áreas, incluindo fontes de energia, transporte e produção industrial [10].

Durante essa época, as fábricas eram geralmente pouco mecanizadas e apresentavam um design simples, onde os equipamentos operavam de maneira independente e eram frequentemente sujeitos a sobrecargas [1], [2].

A abordagem predominante para o manejo dos equipamentos era reativa, resumindo-se a uma filosofia de *"deixar o equipamento funcionar até que ele apresente defeitos"* [1]. Esse método levou ao predomínio da Manutenção Corretiva, que consistia em intervenções realizadas por técnicos qualificados, com o objetivo de restaurar o funcionamento adequado dos sistemas defeituosos [1].

### 2.2.2 Segunda Revolução Industrial: Manutenção Preventiva

A Segunda Revolução Industrial, que começou por volta de 1870, foi impulsionada pela eletrificação do meio industrial e pelo advento das linhas de montagem [10]. Durante esse período as instalações industriais sofreram um aumento significativo na sua complexidade tecnológica, com um enfoque especial na integração das linhas de produção [1], [2].

À medida que os processos industriais se tornaram mais sofisticados, os custos associados às falhas dos equipamentos cresceram exponencialmente, de forma que a adoção exclusiva da Manutenção Corretiva se tornou demasiadamente custosa [10]. Isso gerou um interesse crescente em metodologias de Manutenção Preventiva (MP), caracterizada por ações programadas destinadas a prolongar a vida útil dos equipamentos e minimizar o desgaste dos mesmos [10]. Essas ações eram baseadas em cronogramas fixos ou avaliações do estado geral dos equipamentos, com intervenções de manutenção ocorrendo apenas quando eram identificados desvios significativos no desempenho das máquinas [10].

Dado o impacto financeiro da manutenção, a frequência e os investimentos nessa área tornaram-se objeto de estudo: modelos e técnicas foram desenvolvidos para maximizar o custo-benefício das estratégias de manutenção, visando uma operação mais eficiente e econômica [1].

### 2.2.3 Terceira Revolução Industrial, Indústria 3.0: Manutenção Proativa

A Terceira Revolução Industrial marca uma era de transformações significativas, caracterizada pelo desenvolvimento da eletrônica e ascensão da tecnologia da informação, representando uma evolução natural em relação aos meios desenvolvidos anteriormente [10].

Este período testemunhou um incremento substancial no nível de automação e elevadas exigências de desempenho dos sistemas, impulsionando o desenvolvimento de novas abordagens de engenharia e técnicas de gestão inovadoras na área de gestão de ativos [11].

A manutenção evoluiu de uma função meramente técnica para se tornar um componente crítico da gestão estratégica [1]. A análise e resolução de problemas de manutenção começaram a ser integradas já na fase de planejamento e montagem das linhas de produção, de forma a otimizar os fatores de Disponibilidade, Fiabilidade e Manutibilidade dos equipamentos e linhas de produção, os quais são definidos a seguir [1], [12]:

- Disponibilidade: *"...a capacidade de o item estar operacional e utilizável por um período definido."*
- Fiabilidade: *"...a probabilidade de o equipamento funcionar corretamente dentro das expectativas."*
- Manutibilidade: *"...a facilidade e eficiência com que um equipamento pode ser mantido ou restaurado às suas condições ideais, através de manutenção programada ou emergencial."*

Durante este período destacaram-se três abordagens inovadoras de manutenção: a Manutenção Produtiva, a Manutenção Produtiva Total (TPM, *Total Productive Maintenance*) e a Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM, *Reliability Centred Maintenance*) [10].

A Manutenção Produtiva combina estratégias de Manutenção Corretiva e Preventiva com técnicas baseadas em dados para melhorar a eficiência da produção. Esta metodologia foca na identificação e resolução proativa de problemas potenciais, como lubrificação inadequada, desalinhamento e contaminação, que podem causar falhas nos equipamentos [10].

A TPM, desenvolvida no Japão, busca aprimorar a eficiência das máquinas, reduzir custos de manutenção e minimizar perdas causadas por inatividade [10]. Essa abordagem promove uma comunicação eficaz entre operadores e equipas de manutenção e requer uma mudança de mentalidade para otimizar a interação entre humanos e máquinas, incentivando os operadores a participar ativamente da manutenção [10].

A RCM, investigada nos Estados Unidos, define padrões de manutenção adaptados ao contexto operacional dos ativos, assegurando que continuem a satisfazer as exigências operacionais [10]. A RCM envolve monitorizar o desempenho dos componentes, categorizando as falhas de acordo com sua severidade através da análise FMEA, e adapta as atividades de manutenção para prolongar a vida útil dos equipamentos num regime de constante avaliação e operação [10].

#### 2.2.4 Quarta Revolução Industrial, Indústria 4.0: Manutenção Condicionada

Enquanto as três primeiras Revoluções Industriais foram nomeadas retrospectivamente, a Quarta Revolução Industrial está acontecendo em tempo real, com os impactos do seu desenvolvimento tecnológico ainda em análise [10].

As principais características deste período consistem [13]:

- No uso extensivo da Internet e de dispositivos inteligentes interligados, aumentando significativamente os níveis de automação e automatização industrial;
- Na flexibilidade sem precedentes para personalização através de tecnologias, como impressão 3D, contrastando com as produções em massa e pouco personalizadas das revoluções anteriores;
- Na rastreabilidade avançada, que permite a identificação de componentes até aos menores detalhes por meio de códigos únicos, facilitando o rastreamento preciso de anomalias e falhas de produção.

Os avanços tecnológicos desta era, incluindo o uso de novos materiais, sensores de monitorização avançados e técnicas sofisticadas de recolha e análise de dados, adicionaram complexidade ao campo da manutenção [1].

Neste contexto, emergiu a Manutenção Preditiva (PdM, *Predictive Maintenance*), uma abordagem que emprega dados e análises avançadas para prever falhas em ativos, permitindo que as equipas de manutenção agendem reparações ou substituições proactivamente, minimizando assim o tempo de inatividade e reduzindo custos [10]. A Manutenção Preditiva incorpora tecnologias, como sensores, Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*), *Big Data*, computação em nuvem, inteligência artificial, além de redes móveis e *WiFi*, elevando as exigências por profissionais qualificados, como engenheiros e cientistas de dados [10].

De forma similar, a Manutenção Condicionada (CBM, *Condition Based Maintenance*) baseia-se na monitorização contínua da condição (CM, *Condition Monitoring*) para determinar a necessidade de manutenção, com intervenções realizadas apenas quando há evidências claras de problemas iminentes [14]. Esta abordagem tem-se mostrado eficaz na redução de custos de manutenção, aumento da disponibilidade dos equipamentos e na melhoria da competitividade das empresas de fabrico e de serviços [15].

Recentes estudos na literatura enfatizam o papel ativo dos investigadores em avançar nas tecnologias de Manutenção Condicionada, focando-se no desenvolvimento de métodos para a sua aplicação e na redução de custos de implementação [6], consolidando-a como a técnica mais moderna na área da manutenção [16].

### 3 MANUTENÇÃO CONDICIONADA

Como discutido anteriormente, a Manutenção Condicionada, ou Manutenção Baseada na Condição (CBM) representa a abordagem mais avançada na atualidade no campo da Manutenção [16].

A CBM é investigada desde a década de 1950, com adoção notável nos setores automotivo, aeroespacial, militar e de fabrico [6]. Hoje, a tecnologia CBM atrai investimentos substanciais de grandes entidades, incluindo o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (compreendendo o Exército, a Força Aérea, a Marinha e os Fuzileiros Navais) e corporações líderes como a GM, *Honda*, GE, *Digitech*, *Honeywell*, entre outras [6].

Na CBM, os equipamentos industriais são dotados de sistemas manuais ou automáticos que realizam inspeções periódicas em componentes específicos, com o objetivo de avaliar o estado geral do equipamento e destes elementos, de forma a determinar as suas taxas de deterioração [17]. Posteriormente, com base na análise dos dados de monitorização é tomada a decisão quanto à necessidade de substituição ou reparação [17].

Esta forma de trabalho permite a diminuição dos Custos do Ciclo de Vida (LCC, *Life Cycle Cost*), de instalações de produção, equipamentos e estruturas, tendo em vista que a aplicação da CBM permite [17]:

- Minimizar os Custos de Capital, inclusive equipamentos de reserva e peças de reposição de serviço;
- Diminuir os Custos de Operação decorrentes de perdas de produção devido a falhas;
- Reduzir os Custos de Manutenção, que abrangem manutenção não programada, danos consequentes, falhas induzidas e custos internos.

Quando aplicada de forma eficaz, a metodologia CBM pode resultar em economia de custos em equipamentos, mão de obra e materiais, melhorando a eficiência dos serviços de manutenção e o funcionamento geral da linha de produção, ocasionando a obtenção de maiores lucros [17], dado que a monitorização dos dados tem a capacidade de oferecer *insights* profundos sobre o desempenho, a integridade, a causa raiz de falhas e a capacidade de prever a Vida Útil Remanescente (RUL, *Remaining Useful Life*) [6].

Nos últimos anos, devido aos avanços rápidos na ciência e na tecnologia, os sistemas industriais tornaram-se mais eficazes, porém, também mais complexos [18], [19]. Assim, a adoção da CBM mostra-se muito importante, dado que o custo das perdas

de produção resultantes de avarias nesse tipo de instalação de produção está rapidamente tornando-se demasiado alto [17], [18].

Desenvolvimentos recentes impulsionaram melhorias nas capacidades de recolha, recuperação e análise de dados e nos recursos de suporte para gerir conjuntos de dados de séries temporais extensos [6], [18] o que permite análises mais profundas e eficientes do estado geral do sistema acompanhado via CBM.

Em resumo, o objetivo da CBM é proceder com a obtenção e processamento de dados para fundamentar a tomada de decisão, conseqüentemente reduzindo os custos envolvidos em reparações e falhas [8], [20]. Pode-se observar na Figura 3.1 uma visão esquemática deste processo.



**Figura 3.1 – Processo CBM simplificado [8]**

### **3.1 Obtenção de Dados**

A obtenção de dados é um componente essencial para a implementação eficaz de programas CBM, envolvendo a recolha de dois tipos principais de dados: dados de evento e de monitorização de condição [20], descritos a seguir:

- **Dados de Evento**
  - Incluem informação sobre ocorrências, como instalações, falhas ou revisões;
  - Detalham ações realizadas, como reparações menores, manutenção preventiva ou troca de óleo.
- **Dados de Monitorização de Condição**
  - Referem-se às medições que indicam o estado de saúde do ativo físico;
  - São extremamente versáteis, podendo ser dados de vibração, acústica, análise de óleo, temperatura, pressão, humidade, dados metrológicos ou ambientais, entre outros.

No contexto da CBM, tanto os dados de eventos quanto os dados obtidos por sensores são de igual importância [20]. Embora, frequentemente os dados de eventos sejam negligenciados em favor dos dados sensoriais, eles são essenciais para avaliar o desempenho dos atuais indicadores de condição [20].

A entrada manual de dados ainda é uma prática comum e sujeita a erros que podem comprometer a integridade da informação [20]. A automação desses processos minimiza a necessidade de intervenção humana, reduzindo significativamente as chances de erro e melhorando a fiabilidade dos dados recolhidos [20], [21].

O uso estratégico de tecnologias avançadas na monitorização de condição assegura não apenas a fiabilidade e eficiência dos equipamentos, mas também melhora a precisão da manutenção preditiva, permitindo intervenções mais estratégicas e preventivas, que garantem uma operação contínua e eficaz [18], [20].

A evolução e integração dos sistemas CBM tem melhorado significativamente a aquisição e a gestão dos dados [18]. Com isso, a dependência de especialistas para interpretar, por exemplo, dados de vibração, é reduzida, favorecendo sistemas mais eficientes. Isso resulta em melhorias diretas, tanto nos resultados obtidos quanto nos custos associados à manutenção de equipamentos críticos [18].

### 3.2 Monitorização de Condição

Conforme visto anteriormente, a Monitorização de Condição (CM) é um conjunto de ferramentas para obter informação referente ao desempenho e condição dos equipamentos dentro de um sistema [8].

A CM tem um duplo propósito [8]:

- Reunir dados sobre a condição e estado do equipamento;
- Aumentar a compreensão das causas e efeitos de falhas e padrões de deterioração, de forma a basear a tomada de decisões de manutenção.

O processo de monitorização pode ser conduzido de duas maneiras [8]:

- *Online*, que ocorre enquanto o equipamento está em operação;
- *Offline*, que, em contrapartida, é executado quando o equipamento não está a funcionar.

Em relação à periodicidade, a CM pode ser [8]:

- Periódica, quando é realizado em intervalos específicos, tal como verificações horárias ou ao final de cada turno. Costuma-se utilizar equipamentos como medidores portáteis, unidades de emissão acústica e canetas de vibração. Também pode incluir avaliações sensoriais, como o nível de sujidade ou cores incomuns;
- Contínua, quando opera de forma automática e contínua através de dispositivos de medição especializados, como sensores de vibração e acústicos.

A análise de vibração é a técnica dominante utilizada para programas de CM [22], dado o fato de que os sistemas mecânicos e as máquinas constituam a maioria dos equipamentos da fábrica [23]. A técnica utiliza o ruído ou vibração gerada por equipamentos mecânicos e, em alguns casos, por sistemas da fábrica, para determinar a sua condição real [22]. Avanços recentes na tecnologia de microprocessadores permitiram que a monitorização baseada em vibrações fosse usada de forma custo-efetiva na maioria das aplicações de fabrico e processos [22].

Além da análise de vibração, uma abordagem abrangente deve incluir outras técnicas de diagnóstico [22], [23]. Essas técnicas incluem Tribologia, Monitorização de Parâmetros de Processos, Inspeção Visual, Termografia, Análise Sonora, Termografia, Ultrassom e testes não destrutivos [8], [22], [23], [24].

### 3.2.1 Monitorização de Vibração

Como visto anteriormente, a monitorização de vibrações é a principal técnica de monitorização na CM, especialmente para equipamentos rotativos, como rolamentos e caixas de engrenagens [8], [23], [24].

A integridade do equipamento é avaliada através do uso de dispositivos especializados, como sensores de vibração, para detetar alterações que indiquem danos ou deterioração [8], [23], [24]. Geralmente é realizado *online*, de forma periódica ou contínua. [8]

São avaliados dois aspetos principais [23], [25]:

- Magnitude (nível geral), que ajuda a medir a severidade da vibração;
- Conteúdo de frequência, indica a fonte ou origem das vibrações.

A velocidade de vibração, normalmente medida em valor médio quadrático (RMS, *Root Mean Square*), é um critério significativo para avaliar a condição do equipamento. A análise do espectro de frequência, geralmente realizada digitalmente usando a transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), é amplamente utilizada no diagnóstico de falhas em máquinas rotativas [23], [25].

### 3.2.2 Monitorização Sonora

A monitorização sonora, intimamente relacionada com a Monitorização de Vibração, é também uma técnica de CM amplamente utilizada [8].

Enquanto os sensores de vibração registam movimentos, os sensores acústicos captam sons emitidos pelo equipamento durante o seu estado de operação,

fornecendo informação precisa sobre ruídos, atrito excessivo e outras anormalidades [8].

Semelhante à monitorização de vibração, a monitorização sonora pode ser realizada *online*, de forma periódica ou contínua [8].

### 3.2.3 Tribologia – Monitorização de Lubrificação e Partículas de Desgaste

Tribologia é o termo que engloba os aspetos de *design* e operacionais referentes a lubrificação, fricção e desgaste de superfícies, tais como num sistema rolamento-lubrificação-rotor de uma máquina [23].

Dois parâmetros importantes que envolvem aplicações de tribologia são monitorizados numa rotina de CM: óleo lubrificante e partículas de desgaste [23].

Na Monitorização de Lubrificação, ou de Óleo, a qualidade do óleo é avaliada para determinar a sua adequação para uso contínuo [8].

Paralelamente, os resultados da análise de óleo podem revelar as condições de desgaste dos componentes internos lubrificados com óleo, como eixos de motores [8], dado que, com o tempo, o óleo acumula informação sobre a condição da máquina, incluindo partículas metálicas de desgaste e produtos de combustão [24], [25].

A identificação e medição destas partículas fornecem informação sobre as taxas de desgaste e os níveis de contaminação do óleo, o que possibilita prever falhas iminentes sem desmontar o equipamento [25].

A análise de óleo lubrificante também auxilia no agendamento de intervalos de troca de óleo com base na condição real do lubrificante, podendo resultar em economias anuais significativas nos custos de manutenção para fábricas de médio a grande porte. Amostragem e testes frequentes são essenciais para determinar o momento apropriado para uma troca de óleo [23].

### 3.2.4 Inspeção Visual

A inspeção visual é um dos métodos mais antigos de monitorização, consistindo inicialmente em verificações regulares feitas por técnicos de manutenção para identificar anomalias que poderiam indicar falhas [23]. Atualmente, além de ser realizada através de avaliações sensoriais, essa inspeção também pode utilizar instrumentos sofisticados para uma análise mais precisa [26]. É importante notar que muitos sistemas modernos de monitorização baseados em vibração já integram a capacidade de registar essas observações visuais no processo de recolha de dados [18].

Essas inspeções são essenciais para qualquer programa de monitorização de condição, pois captam problemas que métodos mais avançados podem deixar passar

[18]. Por fim, os dados visuais agregam valor à monitorização, complementando as técnicas primárias utilizadas, independentemente das suas especificidades [18].

### 3.2.5 Outros tipos de Monitorização

Para além das técnicas acima descritas, há aspetos adicionais que podem fornecer informação sobre o estado do equipamento, das quais se destacam [23], [24], [25]:

- Termografia - utiliza câmaras infravermelhas especializadas para identificar pontos quentes em máquinas, o que pode revelar possíveis problemas em componentes ou operações através da deteção e análise de emissões de calor;
- Ultrassom - assim como a monitorização de vibração, também consiste numa análise de ruído, diferenciando-se desta pela faixa de frequência que monitoriza acima dos 30.000 Hz. É útil para aplicações, tais como a deteção de vazamentos de gases e outros fluídos e medição do nível de ruído em ambientes industriais;
- Elétrico - mede mudanças nas propriedades de resistência, condutividade, rigidez dielétrica e potencial. É eficaz na deteção de deterioração do isolamento elétrico, curtos-circuitos, danos elétricos em motores, entre outros.

### 3.3 Processamento de Dados

O Processamento de Dados consiste no estudo dos dados obtidos através da monitorização de condição e dos dados do evento, de forma a determinar-se o estado geral do equipamento por meio de técnicas específicas de análise [20].

O primeiro passo no processamento de dados é a limpeza, essencial para corrigir erros comuns [20]. A limpeza de dados evita a situação "*garbage in, garbage out*" (entrada de lixo, saída de lixo), onde dados de má qualidade resultam em análises igualmente ruins [20].

Para dados de evento, alguns erros advêm da entrada manual de dados, dos quais se destacam dados ausentes, entradas duplicadas, valores fora do intervalo esperado e erros de digitação [20].

Para dados de monitorização de condição, erros de leitura podem resultar de falhas nos sensores, como leituras inconsistentes ou erros de calibração. Ferramentas gráficas e exames manuais detalhados são frequentemente empregues para identificar e corrigir esses problemas [20].

Após a limpeza, a próxima etapa é classificar e analisar a informação para uma melhor compreensão e interpretação [20]. Existem diversas técnicas e ferramentas para esse

efeito a depender dos tipos de dados trabalhados [20]. Os dados de monitorização de condição podem ser classificados em três tipos principais [20]:

- Tipo Valor - Dados únicos recolhidos num momento específico, como medidas de temperatura e pressão;
- Tipo Forma de Onda - Séries temporais recolhidas ao longo do tempo, como dados de vibrações e acústicos;
- Tipo Multidimensional - Dados que contêm várias dimensões, como imagens de raios-X e termografias infravermelhas.

### 3.3.1 Análise de Dados do Tipo Valor

Esses dados incluem tanto os valores brutos quanto os extraídos de sinais processados [20]. Técnicas de análise multivariada, como a Análise de Componentes Principais (PCA, *Principal Component Analysis*) e a Análise de Componentes Independentes (ICA, *Independent Component Analysis*), são usadas para lidar com grandes conjuntos de variáveis [20]. Técnicas de análise de tendência, como regressão e modelos de séries temporais, são aplicadas para prever comportamentos futuros [20].

### 3.3.2 Análise de Dados de Formas de Onda

Há três abordagens principais para analisar dados de formas de onda [20], [27]:

- Domínio do Tempo - Calcula características estatísticas diretamente dos sinais de forma de onda, como média, desvio padrão e raiz quadrada média. Técnicas avançadas utilizam modelos de séries temporais, como o modelo autorregressivo (AR, *Auto Regressive*) e o modelo autorregressivo de média móvel (ARMA, *Auto Regressive Moving Average*);
- Domínio da Frequência - Utiliza transformações, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT), para identificar componentes de frequência. Espectros de potência e *cepstrum* são ferramentas comuns nessa abordagem.
- Tempo-Frequência - Necessária para sinais não estacionários. Inclui a Transformada de Fourier de Curto Prazo (STFT, *Short Time Fourier Transform*) e a Transformada *Wavelet*, que permitem analisar sinais em ambos os domínios do tempo e da frequência.

### 3.3.3 Análise Combinada de Dados de Eventos e Monitorização de Condição

A combinação de dados de eventos e de monitorização de condição melhora a análise e o diagnóstico de falhas [20], [27]. Modelos matemáticos, como o modelo de riscos proporcionais (PHM, *Proportional Hazard Model*) e modelos de Markov ocultos (HMM,

*Hidden Markov Models*), são usados para integrar esses dados [20], [27]. Esses modelos ajudam a prever falhas com base na idade e condição das máquinas, auxiliando na tomada de decisões de manutenção [20], [27].

### 3.4 Tomada de Decisão

No âmbito da CBM, a tomada de decisões pode ser dividida em dois aspectos cruciais: Diagnóstico e Prognóstico [8].

O Diagnóstico consiste na capacidade de avaliar o estado de uma máquina através da análise da sua condição ou sintomas, com o objetivo de determinar a natureza de um modo de falha e identificar o componente do sistema que precisa de reparações [27].

Formalmente, a Norma ISO13381-1 define *Prognóstico* como “uma estimativa do tempo de falha e do risco para um ou mais modos de falha existentes e futuros” [28]. O desenvolvimento do Prognóstico, considerado o processo-chave de qualquer iniciativa de CBM [29], é um dos objetos de estudo deste trabalho, necessitando de informação obtida e registada previamente durante o Diagnóstico [28].

É importante notar que a presença de condições anormais que possam precisar de reparações, os modos de falha, não significa necessariamente que o equipamento se encontra inutilizado, visto que ele ainda pode funcionar por algum tempo antes que uma falha funcional ocorra. Esse conceito é ilustrado na Figura 3.2 através do intervalo P-F [8], [28], [30].

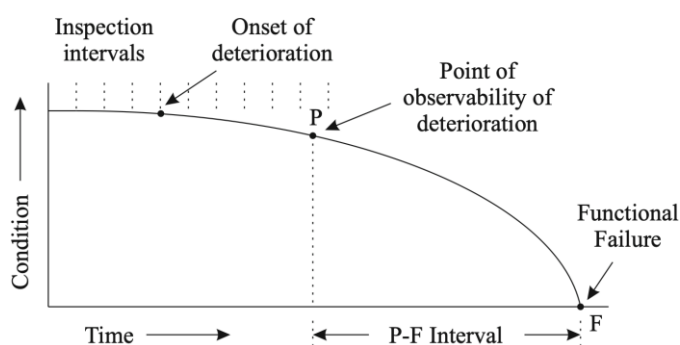


Figura 3.2 – Curva P-F [30]

A curva P-F proporciona uma visão clara do posicionamento dos sistemas de Diagnóstico e Prognóstico na curva de degradação de um equipamento, conforme descrito a seguir [30]:

1. Inicialmente, há o ponto em que a deterioração começa, quando a linha toca no eixo *Condition*.

2. Em seguida, há o ponto "P" (*Potential Failure*), que indica quando uma falha se torna observável. Isso pode ser percebido em termos absolutos, como uma rachadura ou fratura no equipamento, ou em relação às capacidades da técnica de monitorização, como variações nas medidas sonoras ou vibratórias;
3. Finalmente, há o ponto "F" (*Failure*), que marca a falha funcional, quando o sistema não pode mais atender aos critérios de desempenho pretendidos.

Melhorias no CBM envolvem deslocar o ponto "P" para um estágio anterior na operação do sistema, permitindo que a deterioração seja observada e tratada com a maior antecedência possível, minimizando prejuízos na etapa de Diagnóstico [30].

No Prognóstico, o foco está no futuro além do ponto "P" na curva P-F. Envolve a previsão da trajetória da curva além deste ponto [30] proporcionando um alerta antecipado de quando o equipamento irá falhar [28]. Esta abordagem permite a utilização otimizada do equipamento e ajuda a determinar o momento ideal para a manutenção preventiva, pouco antes de uma falha real ocorrer [28]. Por isso é considerada o processo chave do CBM [29].

A Figura 3.3 possui um fluxograma da interação entre os processos de Diagnóstico e Prognóstico, com etapas sequenciais e seus objetivos.

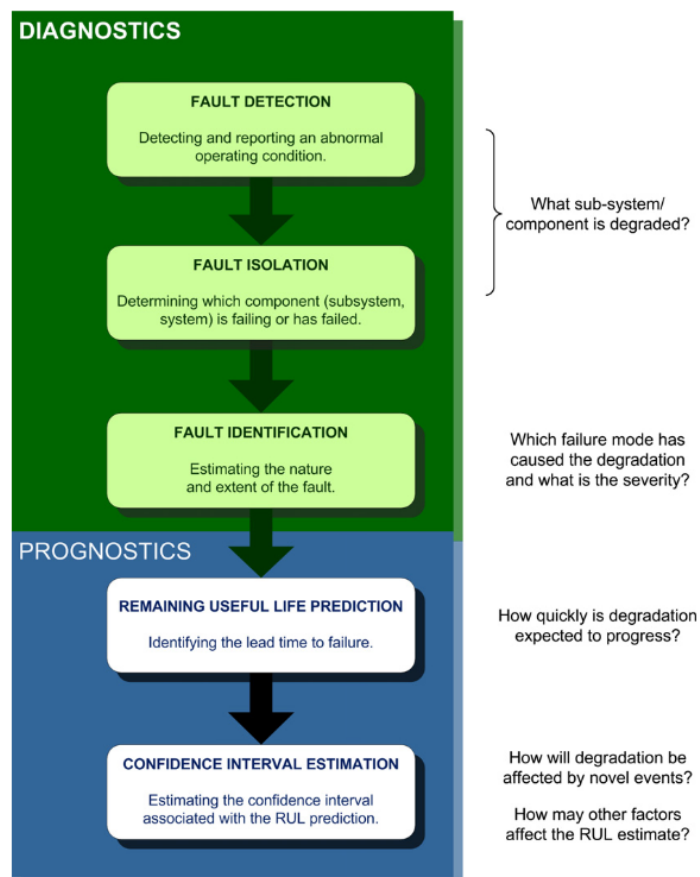


Figura 3.3 – Principais Etapas entre Prognóstico e Diagnóstico [28]

O resultado do Prognóstico compreende dois elementos principais [28]:

- O cálculo da RUL;
- Um intervalo de confiança correspondente ao cálculo anterior.

A inclusão deste valor de confiança é crucial devido à incerteza do processo de degradação, dos parâmetros de operação futura da máquina, bem como aos potenciais erros associados às metodologias diagnósticas e prognósticas em uso [28]. Além disso, pode ser necessário prever a probabilidade de uma máquina operar sem interrupção ou falha até um determinado tempo futuro, um tipo de previsão que pode utilizar metodologia similar ao cálculo da RUL [31].

### 3.5 Diagnóstico

A etapa de Diagnóstico envolve a identificação e classificação de falhas com base em dados obtidos através de medições e características extraídas de sinais de condição da máquina, efetivamente da CM e por meio dos Dados de Eventos. Tradicionalmente, o reconhecimento de padrões é realizado manualmente com o auxílio de ferramentas gráficas, como gráficos de espectro de potência, gráficos de fase de espectro, gráficos de *cepstrum* e espectrogramas [20], [27]. No entanto, o reconhecimento manual de padrões exige uma *expertise* significativa na aplicação diagnóstica específica, tornando a automação deste processo altamente desejável [20], [27].

#### 3.5.1 Abordagens Estatísticas

Uma abordagem comum para o diagnóstico de falhas é baseada em métodos estatísticos, como o controlo estatístico de processo (SPC, *Statistical Process Control*), que mede a variação do sinal atual em relação a um sinal de referência representando a condição normal da máquina [20], [27]. Outra técnica estatística frequentemente utilizada é a análise de agrupamento (*cluster analysis*), que classifica sinais em diferentes categorias de falhas com base na similaridade das características que possuem [20]. Medidas de distância, como a distância Euclidiana e a distância *Mahalanobis*, são comumente usadas para determinar a similaridade entre sinais [20].

#### 3.5.2 Abordagens de Inteligência Artificial

Técnicas de Inteligência Artificial (IA) têm sido progressivamente aplicadas ao diagnóstico de falhas em máquinas, mostrando desempenho superior em comparação com abordagens convencionais [20], [27]. Entre as técnicas de IA mais populares estão as redes neurais artificiais (ANN, *Artificial Neural Networks*) e os sistemas especialistas (ES, *Expert Systems*) [20], [27]. As ANNs são modelos computacionais que mimetizam a estrutura do cérebro humano, consistindo de elementos de processamento simples ligados numa estrutura complexa de camadas, permitindo a

aproximação de funções não lineares complexas [20]. As redes neurais de retropropagação (BP, *Backpropagation*) e as redes de correlação em cascata (CCNN, *Correlation Cascade Neural Networks*) são exemplos específicos de modelos de ANNs aplicados ao diagnóstico de falhas [20].

Os sistemas especialistas (ES) utilizam o conhecimento de especialistas num programa de computador com um motor de inferência automatizado, de forma a resolver problemas através de processamento automatizado [27]. Métodos de raciocínio comuns para ESs incluem o raciocínio baseado em regras, o raciocínio baseado em casos e o raciocínio baseado em modelos [27].

### 3.5.3 Modelos Físicos

Abordagens baseadas em modelos físicos utilizam modelos matemáticos explícitos da máquina monitorizada para gerar sinais residuais indicativos da presença de falhas [20]. Esses modelos podem ser mais eficazes do que as abordagens que não utilizam modelos, desde que o modelo matemático seja preciso e correto. No entanto, a modelação matemática explícita pode não ser viável para sistemas complexos [20].

### 3.5.4 Abordagens Híbridas

Combinações de técnicas de IA com outras abordagens têm mostrado potencial significativo para melhorar os sistemas de diagnóstico de máquinas [20], [27]. Por exemplo, uma abordagem híbrida que combina redes neurais, lógica *fuzzy* e sistemas especialistas foi sugerida para integrar o conhecimento do domínio e os dados de teste e operacionais da máquina, promovendo-se condições para realização de Diagnóstico e Prognóstico [27].

## 3.6 Prognóstico e Vida Útil Remanescente (RUL)

A motivação para desenvolver métodos prognósticos vem do conservadorismo presente em muitas políticas tradicionais de manutenção [30]. Em políticas preventivas aplicadas a sistemas críticos, como aeronaves, plantas nucleares e instalações de petróleo e gás, há componentes que são tipicamente substituídos muito antes do fim de sua vida útil, em grande parte graças à incerteza na evolução dos danos em caso de falha [30]. A falta de clareza faz com que os intervalos de substituição sejam definidos de forma conservadora, o que leva a altos custos de manutenção e desperdício dos componentes [30], tornando claras as vantagens de uma estimativa de Vida Útil Remanescente (RUL) para maximização do investimento em substituições.

A Norma ISO13381-1 estabelece um processo de prognóstico, incluindo-se os dados e parâmetros a serem analisados para uma estimativa precisa da RUL e do nível de

confiança relacionado a um sistema [29]. Pela Norma, o Prognóstico deve seguir uma sequência de quatro etapas, como segue [29]:

1. Pré-processamento - São identificados todos os modos de falha existentes, as suas interconexões, sintomas, parâmetros e descritivos, juntamente com os possíveis modos de falha futuros;
2. Prognóstico dos modos de falha existentes - É realizado um estudo abrangente de todos os modos de falha existentes, com cálculos de severidade e da RUL;
3. Prognóstico dos modos de falha futuros - Envolve a estimativa dos modos de falha futuros mais prováveis, bem como dos fatores de influência entre estes e os modos já existentes. É calculada a RUL para os modos de falha futuros;
4. Prognóstico pós-ação - O sistema de prognóstico propõe ações de manutenção destinadas a evitar, reduzir ou atrasar os efeitos dos modos de falha. Após a implementação dessas ações, um novo prognóstico é elaborado, levando em consideração as ações sugeridas, e a confiança associada à RUL é recalculada.

Pode-se notar que a primeira etapa parte de uma correta identificação dos modos de falha presentes no equipamento, resumindo em si os resultados da etapa de Diagnóstico.

Para a realização destas previsões, os algoritmos podem ser divididos em três tipos de abordagem, a serem escolhidos conforme avaliação prévia dos dados, a complexidade do sistema e o tipo de previsão a que se destinam [31], [32]:

- Modelos Físicos - Aproveitam o conhecimento do sistema físico para modelar padrões de degradação, geralmente no nível do componente, levando em conta fatores como desgaste, laceração, rachaduras, entupimentos e corrosão. Nessa abordagem, as leis físicas que descrevem a dinâmica do sistema em condições normais de operação são utilizadas para estimar a vida útil remanescente ou para prever indicadores de saúde/qualidade;
- Dados - Baseia-se em dados históricos de rotinas operacionais normais e de falhas para desenvolver modelos comportamentais exclusivamente a partir de dados. Esta abordagem inclui técnicas de análise estatística, como SVM (*Support Vector Machine*), ARMA e HMM, além de técnicas de Inteligência Artificial (IA), como ANNs e ESs, entre outros.
- Híbrida - Combina informação de ambas as abordagens anteriores, oferecendo resultados prognósticos mais fiáveis e precisos.

A abordagem baseada em dados requer grandes conjuntos de dados para análise e detecção de anomalias [30]. Em contraste, a abordagem baseada em modelos físicos

utiliza leis físicas e princípios básicos para compensar a falta de dados, sendo mais adequada para sistemas em ambientes variáveis [30]. No entanto, o desenvolvimento de métodos baseados em modelos físicos é geralmente mais demorado devido ao nível de conhecimento detalhado necessário para sua execução [30].

Ao combinar-se ambas as abordagens, pode-se obter algoritmos altamente eficazes, utilizando modelos físicos para preencher lacunas nos conjuntos de dados e técnicas de análise de dados para acelerar o desenvolvimento de modelos físicos [30].

### 3.7 Desafios

A manutenção condicionada apresenta vários desafios complexos agrupados nas seguintes categorias principais [30]:

- **Combinação de Diagnóstico e Prognóstico** - A combinação eficaz de métodos de diagnóstico e prognóstico é um processo longo e complexo. O diagnóstico, que envolve a monitorização contínua ou inspeções periódicas para detetar condições de degradação, fornece alertas imediatos quando um limite predeterminado é atingido. No entanto, ele não prevê a vida útil restante do sistema. Por outro lado, os métodos de prognóstico que utilizam abordagens baseadas em dados ou modelos físicos, podem prever falhas futuras, mas carecem de validação devido à ausência de dados de falhas reais em muitos casos. A integração dessas duas abordagens complementares é crucial para o sucesso da manutenção condicionada;
- **Nível do Sistema versus Nível do Componente** - A manutenção condicionada enfrenta o desafio de ligar a otimização da manutenção em nível de sistema com métodos de prognóstico desenvolvidos ao nível do componente. Sistemas complexos, como navios e aviões, possuem inúmeros componentes e subsistemas. Desenvolver modelos prognósticos para todos esses componentes não é viável, exigindo uma seleção criteriosa dos componentes críticos para a previsão de falhas. Além disso, métodos rápidos e simples são necessários para cobrir os componentes não críticos, evitando falhas imprevistas e custos associados.
- **Monitorização de Uso, Cargas, Condição ou Saúde** - Decidir a estratégia de monitorização mais adequada para cada aplicação específica é um desafio significativo. A monitorização estrutural (SHM, *Structural Health Monitoring*) e a Monitorização de Condição (CM) são essenciais para diagnosticar sistemas, mas exigem a escolha correta da quantidade a ser medida, localização e tipo de sensor;
- **Interpretação dos Dados de Monitorização** - A interpretação eficaz dos dados recolhidos por sensores é crucial, mas desafiadora. Simples tendências ou comparações com limites pré-definidos podem não ser suficientes. É necessário um entendimento profundo do comportamento normal e de falha do

sistema para transformar dados brutos em informação útil. Este desafio é particularmente complexo em sistemas dinâmicos, como pontes ou pás de turbinas eólicas, onde o conhecimento sobre o comportamento dinâmico é fundamental para um diagnóstico preciso.

- Prognósticos Baseados em Dados *versus* Baseados em Modelos - A escolha entre abordagens prognósticas baseadas em dados ou modelos é uma decisão crítica. Métodos baseados em dados, como aprendizado de máquina, requerem grandes quantidades de dados para identificar padrões, mas podem descobrir relações triviais. Métodos baseados em modelos físicos, embora mais precisos, são demorados para desenvolver. A seleção da abordagem mais adequada para uma situação específica será discutida, considerando os prós e contras de cada método.
- Seleção da Abordagem e Técnica Mais Adequadas - A seleção da abordagem e técnica de monitoramento mais adequadas é um desafio significativo. Além de escolher entre métodos de prognóstico baseados em dados ou modelos, é necessário decidir qual técnica de monitoramento de condição é mais apropriada para as limitações técnicas e financeiras de cada situação.
- Qualidade dos Dados - A disponibilidade, acessibilidade e qualidade dos dados são desafios cruciais. A ausência de dados necessários, conjuntos de dados limitados ou a baixa qualidade dos dados podem comprometer a precisão do diagnóstico e prognóstico. Problemas comuns incluem amostragem inadequada, armazenamento insuficiente de histórico de dados e falhas nos sensores ou na transmissão de dados. A qualidade dos dados também pode ser afetada por fatores humanos, como registros manuais imprecisos ou inconsistentes.

Superar os desafios da manutenção preditiva requer uma abordagem integrada que combine diagnóstico e prognóstico, selecione adequadamente as técnicas de monitoramento e assegure a qualidade dos dados, para garantir a eficácia e a precisão na previsão e prevenção de falhas [30].

## 4 JUSTIFICAÇÃO FINANCEIRA DA CBM

Os custos de manutenção representam uma parcela significativa dos custos operacionais totais em instalações industriais. Nos Estados Unidos, esses custos dobraram ao longo de duas décadas, saltando de  $6 \times 10^{11}$  USD em 1981 para  $1,2 \times 10^{12}$  USD em 2000 [33]. Estima-se que, aproximadamente um terço desses gastos seja desperdiçado devido a práticas ineficazes de gestão [33], destacando os custos de manutenção como uma das principais áreas para a implementação de melhorias de curto prazo.

Assim, tem-se que os benefícios financeiros advindos da implantação da CBM são abrangentes e significativos [17], [18], [33], [34], havendo o registo na literatura de diversos casos de sucesso. A Tabela 4.1 destaca exemplos significativos de economias e melhorias operacionais alcançadas através da implementação de estratégias de manutenção preditiva em diferentes indústrias, com destaque para os ganhos na indústria papeleira.

**Tabela 4.1 – Impacto da Manutenção Preditiva em Diversos Setores Industriais [18]**

Empresa	Setor	Melhoria Observada
<i>Georgia Pacific Paper</i>	Fabricação de Papel	de Detecção de problema em bomba via manutenção preditiva evitou um custo de 72 mil USD numa paragem de máquina.
Papeleira (não especificada)	Fabricação de Papel	de Redução das paragens de produção de 300 para 30 em quatro anos usando monitorização de condição.
Empresa especializada em revestimentos	Fabricação de Papel	de Economia de 40 mil USD em três meses com a implementação de manutenção baseada na condição.
<i>British Coal</i>	Mineração de Carvão	de Melhoria na eficiência e redução dos custos de máquinas de mineração pela aplicação sistemática de monitorização de condição.
<i>British Petroleum (BP)</i>	Óleo e Gás	Economias consideráveis alcançadas em um único site com a implementação de um plano geral de monitorização de condição.
Refinaria de <i>Pembroke da Texaco</i>	Refinação	de Quase 500,000 Libras economizadas anualmente com a implementação de um programa de monitorização da energia e da gestão.
Empresa de navegação (não especificada)	Transporte Marítimo	de Economias significativas nos custos de reparação após a introdução de um programa de análise de vibração.

A justificativa financeira para investimentos em CBM é desafiadora, principalmente porque muitas empresas não possuem dados fiáveis para quantificar o custo do tempo de indisponibilidade ou não reconhecem os benefícios da engenharia de manutenção, o que pode levar a um projeto limitado e subfinanciado [34].

Entretanto, a importância em implementar sistemas CBM torna-se crítica quando máquinas dependem exclusivamente de um único componente para funcionamento, como um rolamento ou uma caixa de câmbio [33]. A falha desse(s) componente(s) pode levar a paralisações extensas e não programadas, afetando significativamente a operação da fábrica e a produtividade fabril [33]. Tais paralisações podem custar cifras significativas, além de impactar negativamente as vendas e a satisfação do cliente de maneira quase incalculável [33].

#### 4.1 Manutenção e os *Life Cycle Costs*

De uma forma resumida, o Custo do Ciclo de Vida (*Life-Cycle Cost*, LCC) é caracterizado como uma abordagem abrangente para avaliar os custos totais de um sistema ao longo de sua vida útil [35], incluindo todos os custos desde a aquisição, a operação, manutenção até à eventual descontinuidade do sistema. A fórmula geral para calcular o LCC pode ser analisada através da equação (4.1) [35]:

$$LCC = AC + OC + SC + UC + IL + MC + TC \quad (4.1)$$

Onde:

- *AC (Acquisition Cost)* - Custo de aquisição, relacionado com a compra inicial do equipamento.
- *OC (Operating Cost)* - Custo operacional, associado ao uso contínuo do equipamento.
- *SC (Support Cost)* - Custo de suporte, englobando manutenção e suporte técnico.
- *UC (Unavailability Cost)* - Custo de indisponibilidade, referente às perdas causadas por falhas ou tempo de inatividade.
- *IL (Indirect Losses)* - Perdas indiretas, como causadas por falhas de produção ou redução na qualidade.
- *MC (Modification Cost)* - Custo de modificação, relacionado a ajustes ou melhorias feitas no sistema.
- *TC (Termination Cost)* - Custo de término, associado à descontinuidade ou descarte do equipamento.

Os LCCs são fortemente influenciados pela manutenção [35]. Essa influência pode ser claramente observada em fatores de custo direto, como mão de obra e peças sobressalentes [35]. No entanto, os custos indiretos, como itens rejeitados devido à

manutenção e as perdas de participação de mercado e reputação relacionadas com a manutenção, muitas vezes são difíceis de identificar nos sistemas contabilísticos e podem ser confundidos com outros tipos de despesas [35].

Para avaliar a importância económica de um investimento em manutenção, é essencial analisar as economias geradas ao longo do ciclo de vida do sistema [35]. Desta forma, os fatores do LCC serão empregues como parâmetros de monitorização, fornecendo a informação necessária para a tomada de decisões e garantindo ações eficazes em termos de custo, além de apoiar os esforços contínuos de melhoria [35]. A comparação entre as economias mínimas alcançadas e os investimentos realizados para aprimorar a política de manutenção revela o quão eficiente foi o investimento em manutenção e se ele foi relevante ou não [35].

O impacto dos projetos de manutenção nos Custos do Ciclo de Vida (LCCs) frequentemente resulta na alocação de custos que são regulados ou de compreensão relativamente complexa, alguns dos quais serão discutidos nas seções seguintes.

## **4.2 Custos de aquisição, depreciação, vida útil e valor residual**

Em [36] pode-se encontrar uma clara definição de *custo* em algumas normas contabilísticas como sendo a “quantia de caixa ou seus equivalentes paga ou o justo valor de outra retribuição dada para adquirir um ativo no momento da sua aquisição ou construção ou, quando aplicável, a quantia atribuída a esse ativo aquando do reconhecimento inicial de acordo com os requisitos específicos de outras normas”.

A vida útil de um ativo pode ser definida como “o período durante o qual uma entidade espera que um ativo esteja disponível para uso” ou “o número de unidades de produção ou similares que uma entidade espera obter do ativo” [36].

Também em [36], o conceito de depreciação é introduzido como “imputação sistemática da quantia depreciável de um ativo durante a sua vida útil”.

Por fim, define-se o valor residual como “a quantia estimada que uma entidade obteria correntemente pela alienação de um ativo, após dedução dos custos de alienação estimados, se o ativo já tivesse a idade e as condições esperadas no final da sua vida útil” [36].

Quando se adquire um ativo fixo tangível, o consumo desse bem não ocorre, em regra, em um único período económico [36]. Portanto, não é adequado atribuir o custo total ao período em que o bem foi adquirido [36]. À medida que o ativo é utilizado, ele perde valor até que a sua utilidade se extinga. Para refletir essa depreciação na contabilidade, utiliza-se o método de depreciação [36], de forma a distribuir-se o custo do ativo durante a sua vida útil.

De entre as diferentes técnicas de cálculo da depreciação, o método da linha reta aplica uma depreciação constante ao longo da vida útil do ativo, sendo a depreciação baseada exclusivamente no tempo do ativo, sem levar em conta a atividade produtiva

em si [36]. Este método parece ser o mais adequado em situações onde o equipamento é utilizado de forma constante e quase ininterrupta. A depreciação anual é calculada dividindo o valor depreciável, que é a diferença entre o custo do ativo e o seu valor residual, pelo número de anos de vida útil estimada, conforme a equação (4.2) [36].

$$DepreciaçãoAnual = \frac{CustoInicial - ValorResidual}{VidaÚtil} \quad (4.2)$$

O método da linha reta é amplamente utilizado por sua simplicidade, mas parte do pressuposto de que a utilidade económica do bem e os custos de manutenção e reparação permanecem constantes ao longo de sua vida útil, o que nem sempre ocorre na prática [36]. Embora o método seja fácil de aplicar, ele apresenta desvantagens, especialmente em relação ao aumento dos custos de conservação e reparação à medida que o ativo envelhece [36].

O Decreto Regulamentar n.º 25/2009 [37], de 14 de setembro, estabelece o regime aplicável às depreciações e amortizações para efeitos do imposto sobre o rendimento das pessoas coletivas em Portugal. O seu principal objetivo é definir as condições e os métodos para a aceitação fiscal das depreciações e amortizações, incluindo o cálculo das quotas máximas permitidas para deduções fiscais. A forma como os ativos, tanto tangíveis quanto intangíveis, podem ser depreciados ou amortizados influenciam diretamente o cálculo do lucro tributável e, conseqüentemente, a carga fiscal.

### 4.3 Encargos de pessoal

Os custos de mão-de-obra direta ou de pessoal envolvem despesas associadas aos trabalhadores diretamente envolvidos na produção, como salários e contribuições para a segurança social [38]. Em Portugal, os trabalhadores recebem um subsídio de Natal equivalente a um mês de remuneração, pago até 15 de dezembro, além de férias remuneradas de, no mínimo, 22 dias úteis [39]. Durante as férias, o trabalhador também recebe um subsídio, pago antes do seu início, exceto se houver acordo contrário [39].

Além disso, as contribuições para a segurança social em empresas lucrativas são de 34,75%, com 23,75% sendo responsabilidade do empregador e 11% do trabalhador [40]. O subsídio de alimentação, fixado em 6€ por dia para o setor público em 2024, pode ser isento de IRS no setor privado, com limites de 6€ para pagamento em dinheiro e 9,6€ quando pago em cartão refeição [41], [42]. O subsídio não é pago durante férias ou feriados, sendo calculado apenas pelos dias trabalhados [41], [42].

Outros benefícios incluem contribuições obrigatórias para o Fundo de Compensação do Trabalho e o Fundo de Garantia de Compensação do Trabalho, que garantem compensações em casos de cessação do contrato de trabalho [43]. O seguro de acidentes de trabalho, obrigatório para todas as empresas, cobre riscos profissionais e varia conforme a atividade e o histórico de acidentes da empresa [44]. As gratificações e bonificações, como ajudas de custo e participação nos lucros, podem complementar os rendimentos, dependendo da política da empresa [39].

#### **4.4 Avaliação de projetos de investimento**

A decisão de investir é uma das mais estratégicas para uma organização, sendo essencial para o crescimento sustentável [45]. A avaliação de projetos de investimento tem por objetivo determinar a viabilidade económica e financeira de um empreendimento por meio de indicadores específicos, de forma a orientar-se a tomada de decisão [45], [46]. Esses indicadores permitem avaliar a capacidade do projeto de gerar valor financeiro tanto para a empresa quanto para os seus investidores, garantindo que os recursos sejam aplicados de forma eficiente [46].

Desta forma, ao elencar-se informação financeira pertinente a um projeto e por meio do cálculo de alguns indicadores, é possível perceber a viabilidade do mesmo e, inclusive, comparar alternativas de projeto, permitindo que se determine qual retornaria o melhor lucro [45], [46].

##### **4.4.1 Fluxos de caixa**

Os métodos de avaliação de projetos utilizam o conceito de fluxos de caixa, ou *cash flow* para medir a movimentação de recursos financeiros, identificando entradas e saídas de dinheiro ao longo do ciclo de vida do projeto [45]. A análise do fluxo financeiro permite avaliar a capacidade de uma empresa em gerar dinheiro, oferecendo uma visão sobre as variações na estrutura financeira e a sua adaptação a mudanças e oportunidades de mercado [45]. Esses fluxos financeiros são classificados em três tipos: operacionais, de investimento e de financiamento [45], [46]:

- Os *cash flows* operacionais resultam da soma dos resultados líquidos com encargos não desembolsáveis, como depreciações e provisões [46].
- Os *cash flows* de investimento correspondem a despesas em ativos fixos tangíveis ou intangíveis e no fundo de maneiio, com o objetivo de gerar rendimentos futuros [46].
- O valor residual do investimento, que representa os ativos e o fundo de maneiio no final da vida útil do projeto, também é considerado para evidenciar o património criado [46].

O *cash flow* líquido é calculado subtraindo o *cash flow* de investimento do *cash flow* de exploração (operacional), indicando a capacidade do projeto em cobrir o investimento inicial e gerar retorno para os investidores [46]. Com o cálculo dos fluxos financeiros é possível determinar indicadores de viabilidade econômica, como o Valor Atual Líquido (VAL) e a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR), que consideram o valor temporal do dinheiro e o custo de oportunidade do capital [45].

#### 4.4.2 Taxa de Juro e Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

O juro reflete o valor do dinheiro ao longo do tempo, onde uma quantia futura vale menos no presente. Ele representa a percentagem de retorno sobre o montante inicial investido e pode ser calculado pela equação (4.3):

$$i (\%) = \frac{\text{ValorRecebidoPorUnidadeDeTempo}}{\text{MontanteOriginal}} * 100\% \quad (4.3)$$

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) é a taxa de retorno mínima que um projeto deve oferecer, geralmente superior à de investimentos de baixo risco, como depósitos bancários. Ela é estabelecida por diretores financeiros e está ligada ao custo de capital da empresa.

#### 4.4.3 Valor Atual Líquido (VAL)

O Valor Atual Líquido (VAL) é um critério amplamente utilizado para a avaliação de projetos, pois considera a riqueza real criada pelo projeto, o valor temporal do dinheiro e o custo de oportunidade do capital [45], [46]. O VAL é calculado como o somatório dos *cash flows* líquidos atualizados anualmente, considerando a diferença entre as saídas e entradas de caixa ao longo da vida útil do projeto, utilizando uma taxa de juro fixa e pré-determinada [45], conforme a equação (4.4) [45].

$$VAL = \sum_{t=0}^n \frac{CFt}{(1+k)^t} \quad (4.4)$$

Onde:

*t*: Período específico.

*n*: Total de períodos da vida útil do projeto.

*CFt*: Fluxo financeiro gerado no período *t*.

$k$ : Taxa de atualização, refletindo o custo de oportunidade do capital (Taxa Mínima de Atratividade, TMA).

Um projeto é considerado viável quando apresenta um VAL positivo, indicando que o investimento inicial foi recuperado, a rentabilidade mínima exigida foi alcançada, e ainda gerou-se um excedente financeiro [45].

Ao comparar vários projetos de investimento, deve-se preferir aquele com maior VAL, sendo que projetos com VAL negativo devem ser rejeitados [46]. Projetos com VAL igual a zero são indiferentes, pois apenas recuperam o capital investido, sem gerar excedentes [46]. O VAL é valorizado por sua simplicidade, consistência na seleção de projetos, e por considerar todos os *cash flows* atualizados, apesar de ser sensível à taxa de atualização e à distribuição temporal dos fluxos financeiros [45].

#### 4.4.4 Taxa Interna de Rentabilidade (TIR)

A Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) é a taxa de atualização que iguala o Valor Atual Líquido (VAL) a zero, determinando assim a remuneração máxima que um projeto pode conceder aos investidores sem comprometer o investimento inicial [45], [46], conforme a equação (4.5).

$$VAL = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + TIR)^t} = 0 \quad (4.5)$$

Esse indicador compara a rentabilidade do projeto com a taxa de financiamento, sendo que quanto maior a TIR, maior a rentabilidade [45]. Esse método é especialmente útil quando a taxa de atualização é incerta ou controversa e ao comparar projetos com diferentes níveis de investimento e vidas úteis, sendo frequentemente complementado com o VAL [45], [46]. A decisão de investir é positiva quando a TIR superar a taxa de atualização utilizada [45], [46].

#### 4.4.5 Período de Recuperação do Investimento (PRI)

O período de recuperação do investimento, também conhecido como *payback*, é o tempo necessário para que os fluxos de caixa acumulados de um projeto igualem o montante do capital inicialmente investido, ou seja, o tempo para que o investimento seja recuperado [45], [46]. Esse método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade de cálculo, embora ele não forneça uma medida da rentabilidade do projeto, já que desconsidera os fluxos de caixa após o período de recuperação [45], [46]. O PRI pode ser obtido pela equação (4.6) [46].

$$PRI = t + \frac{\text{Investimento} - \sum_{i=1}^t CF_i}{CF_{t+1}} \quad (4.6)$$

Onde:

$t$ : Número de períodos inteiros após os quais o investimento ainda não foi totalmente recuperado.

*Investimento*: O valor total do investimento inicial.

$\sum_{i=1}^t CF_i$ : Soma dos fluxos de caixa gerados pelo projeto até o período  $t$ .

$CF_{t+1}$ : Fluxo de caixa no período  $t+1$ .

O *payback* é particularmente útil em contextos de risco elevado, como em situações de rápida obsolescência dos equipamentos ou quando a empresa deseja recuperar o capital investido rapidamente para minimizar riscos associados à competitividade e instabilidades económicas ou políticas [45], [46]. Em decisões de aceitação ou rejeição de projetos recomenda-se aceitar o projeto se o período de recuperação for inferior ao limite máximo aceitável [46].

Contudo, como o método não considera o desempenho do projeto após o período de recuperação, ele deve ser usado como um critério complementar em conjunto com outros indicadores de rentabilidade económica [45].

## 5 INDÚSTRIA PAPELEIRA E CORTE DE PAPEL

A história do papel está profundamente ligada ao desenvolvimento da civilização humana [47]. Os primeiros materiais, como o papiro, foram utilizados por egípcios, gregos e romanos, mas o papel moderno teve a sua origem na China [47]. Esta invenção chinesa foi essencial para o progresso da humanidade, permitindo a disseminação do conhecimento, a educação, a arte e o armazenamento de informação [47].

As mudanças no consumo de papel refletem evoluções técnicas, económicas e sociais [47]. O uso de papel para embalagens tem crescido devido ao aumento das compras *online* e da procura por alimentos embalados, além de papel utilizado como alternativa ecológica ao uso do plástico em copos e talheres, por exemplo, enquanto os papéis gráficos e o papel jornal enfrentam declínios [47].

Nas últimas décadas, a indústria do papel passou por uma consolidação significativa a nível global [47]. A globalização causou a concentração de empresas no setor, com a China emergindo como o maior produtor mundial de papel e papelão [47]. Os altos custos de investimento para novas instalações de produção representam um desafio constante para o setor [47].

Em Portugal, o mercado de pasta e papel é de suma importância, sendo a principal indústria da fileira florestal do país. Em 2011, o setor representava 8% da produção industrial e 2,5% da produção nacional, além de ser responsável por 4,9% das exportações e 4% do Produto Interno Bruto (PIB) português [48]. No ranking mundial, Portugal ocupou a 17ª posição na produção de pasta e a 29ª posição na produção de papel [48].

Portugal também se destaca como o terceiro maior produtor de pasta de papel na Europa, representando 7,3% da produção total do continente [49]. Em 2022, a produção de pasta de fibra virgem atingiu 2,87 milhões de toneladas, um aumento de 2,2% em relação ao ano anterior, enquanto a produção de papel e cartão foi de 2,11 milhões de toneladas, com um crescimento de 3,8% [50]. Em termos de papel e cartão, a indústria portuguesa também teve um desempenho notável, contribuindo significativamente para a balança comercial do país, com um saldo comercial positivo em 2022 [50].

### 5.1 Fabricação de Papel

A fabricação moderna de papel pode ser dividida nas seguintes fases principais: preparação da matéria-prima, formação da folha, prensagem, secagem e acabamento [47]. Cada etapa é composta por uma série de subprocessos que são otimizados para maximizar a eficiência e a qualidade [47].

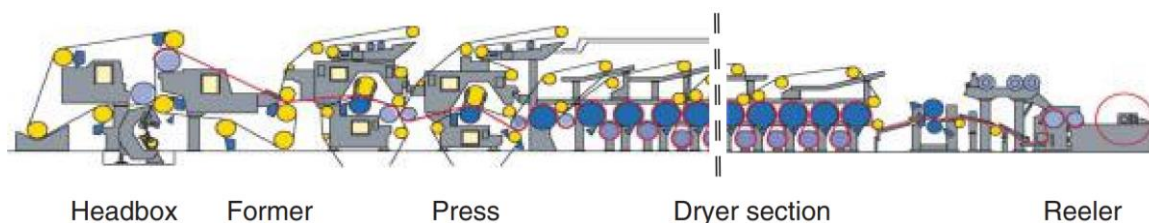
A gestão de resíduos e reciclagem é uma parte essencial da fabricação de papel [47]. A água utilizada no processo de fabricação é tratada e reciclada para minimizar o impacto ambiental [47]. Além disso, os resíduos de produção e papel que não atendem aos padrões são reciclados internamente, retornando ao início do processo de produção [47].

Modernas fábricas de papel utilizam sistemas automatizados para monitorizar e controlar cada etapa do processo, garantindo alta eficiência e qualidade [47]. Amostras de papel são regularmente testadas para verificar as suas propriedades físicas e químicas, assegurando que o produto atenda aos padrões de qualidade exigidos [47]. A Figura 5.1 apresenta uma visão da parte inicial de uma moderna linha de produção de papel.



**Figura 5.1 – Vista de uma linha de fabricação de papel de alta capacidade**

A Figura 5.2 apresenta as seções de uma fábrica de papel para produção de jornais, até a etapa de Enrolamento (*Reeling*).



**Figura 5.2 – Seções de uma máquina de papel para produção de jornais [46]**

As seções seguintes detalham cada uma das etapas envolvidas na produção de papel.

### 5.1.1 Preparação da Matéria-Prima

A produção de papel começa com a preparação da matéria-prima, que inclui fibras secundárias (papel reciclado), fibras primárias (polpa química e mecânica), pigmentos e aditivos químicos [47]:

- Desintegração (*Slushing* ou *Repulping*) - As fibras são transformadas numa suspensão de fibras individuais. Isso é feito em grandes misturadores chamados *pulpers*;
- Refinação - As fibras são refinadas para melhorar suas propriedades de ligação. Refinadores mecânicos são usados para cortar e fibrilar as fibras, aumentando a sua superfície de contato;
- Limpeza e Classificação - As impurezas são removidas da suspensão de fibras usando telas e ciclones. Este processo garante que apenas fibras limpas e uniformes seguem para a próxima etapa;
- Branqueamento - Em alguns casos, as fibras são branqueadas para melhorar a aparência do papel. Agentes químicos, como cloro ou peróxido de hidrogénio, são usados para remover lignina e outras substâncias coloridas;
- Mistura de Aditivos - Pigmentos, enchimentos (como caulim ou carbonato de cálcio) e aditivos químicos são misturados à suspensão de fibras para ajustar as propriedades do papel, como opacidade, brilho e suavidade.

### 5.1.2 Formação da Folha

A formação da folha é a etapa onde a suspensão de fibras é transformada numa folha contínua de papel [47]:

- Cabeçote (*Headbox*) - A suspensão de fibras é distribuída uniformemente através de um cabeçote, que a espalha sobre uma tela móvel, conhecida como tela formadora.
- Formação na Tela (*Wire Section*) - A água é drenada através da tela, deixando uma esteira de fibras. A drenagem é auxiliada por dispositivos de vácuo e elementos de formação que ajudam a distribuir as fibras de maneira uniforme.

### 5.1.3 Prensagem

Após a formação da folha, a água restante é removida por prensagem [47].

- Seção de Prensagem (*Press Section*) - A folha de papel passa através de uma série de rolos de pressão que removem o excesso de água. Esta etapa aumenta a densidade e a força do papel.

#### 5.1.4 Secagem

A folha prensada ainda contém uma quantidade significativa de água, que é removida na etapa de secagem [47].

- Seção de Secagem (*Dryer Section*) - A folha passa por uma série de cilindros aquecidos que evaporam a água restante. A folha seca emerge com uma humidade residual muito baixa.

#### 5.1.5 Acabamento

A última etapa envolve o acabamento da folha de papel para melhorar as suas propriedades físicas e estéticas [47]:

- Calandragem (*Calendaring*) - A folha seca passa por rolos lisos (calandras) que suavizam a superfície do papel e ajustam a sua espessura e brilho;
- Revestimento (*Coating*) - Dependendo da aplicação final, a folha pode receber um revestimento de pigmento para melhorar a qualidade de impressão e outras propriedades superficiais;
- Corte e Enrolamento (*Slitting and Reeling*) - A folha contínua de papel é cortada em rolos menores ou em folhas de tamanho específico, dependendo dos requisitos do cliente;
- Embalagem (*Packaging*) - Finalmente, os rolos ou pilhas de papel são embalados para proteção durante o transporte e armazenamento.

## 5.2 Corte de Bobinas

O corte de bobinas consiste em converter grandes bobinas-mãe da máquina de papel em rolos menores adequados para envio direto ou processamento adicional [47]. A bobinadora, a máquina usada para o corte, consiste em equipamentos para troca de bobina-mãe, uma estação de desenrolamento, uma estação de corte e uma estação de rebobinamento [47], estando presente ao final da linha de produção de papel.

Ao longo dos anos, uma variedade de métodos de corte, técnicas de enrolamento e mecanismos de controle de tensão da bobina foram desenvolvidos e implementados com sucesso, visando otimizar a eficiência e precisão do processo [51].

A Figura 5.3 apresenta duas vistas de uma moderna bobinadora de papel.



a)



b)

**Figura 5.3 – Vistas de uma bobinadora de papel a) aérea e b) frontal, na estação de descarregamento de bobinas<sup>1</sup>**

### 5.2.1 Processo de Corte de Papel

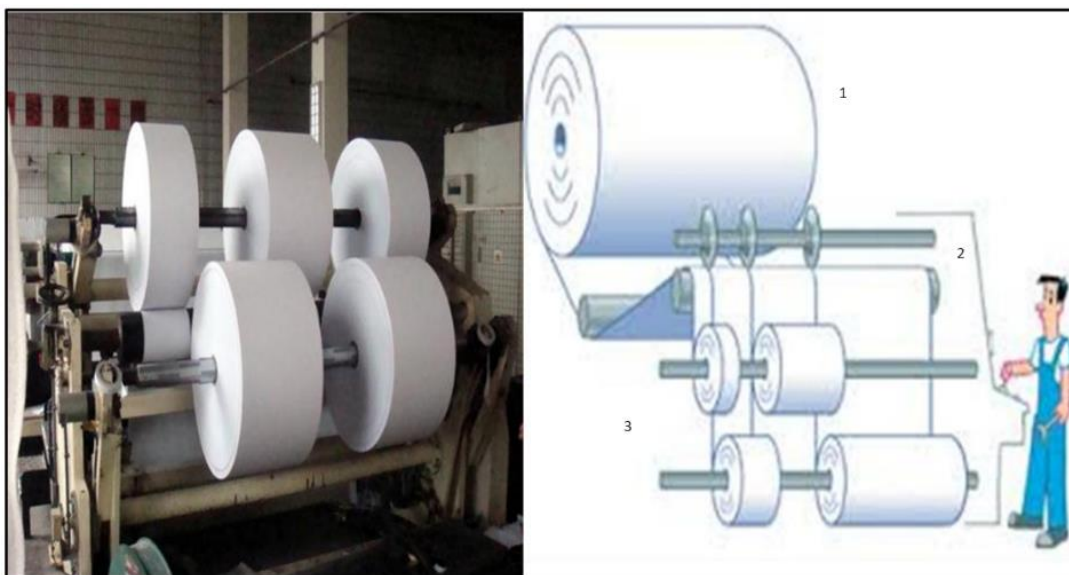
O processo de corte de bobinas-mãe em bobinas menores, realizado pelas bobinadoras, pode ser dividido em três estágios principais [51].

1. Desenrolamento – É onde a bobina-mãe é carregada e fixada em um suporte, permitindo que ela gire em torno de seu eixo central. Durante este processo, é fundamental manter a tensão correta do material para evitar rasgos ou deformações, especialmente em materiais sensíveis. Isso é obtido por meio de

<sup>1</sup> <https://voith.com/corp-en/papermaking/voith-winders.html>, acessado em 16.08.2024

- mecanismos de frenagem controlados que ajustam a tensão conforme necessário.
2. Corte - Aqui, ocorre a separação da folha contínua de papel em várias tiras menores. O papel desenrolado passa por uma série de rolos que o alinham antes de entrar na cabeça de corte, onde lâminas rotativas (ou facas) realizam o corte do papel nas larguras desejadas. Dependendo do tipo de máquina, o posicionamento dessas lâminas pode ser ajustado manual ou automaticamente para definir as larguras das tiras cortadas. Esse processo garante que os cortes sejam precisos e de alta qualidade.
  3. Rebobinagem - As tiras cortadas são enroladas em novos núcleos menores, formando rolos de dimensões específicas. Vários fatores influenciam a escolha do tipo de rebobinador, incluindo o tipo de material e a rigidez desejada para o rolo final. Durante a rebobinagem, é crucial manter as tiras cortadas separadas para evitar que elas se entrelacem, garantindo que cada rolo seja uniformemente enrolado e bem definido.

A Figura 5.4 possui uma representação compacta deste processo.



**Figura 5.4 – Representação do processo de corte de papel em uma bobinadora, adaptada com a indicação numérica de cada etapa [51]**

Além disso, existem três métodos principais de corte utilizados para separar a folha larga em tiras menores: cisalhamento, lâmina e corte por pressão, cuja decisão de escolha depende das características do material, com o objetivo de garantir um corte limpo e preciso [51].

### 5.2.2 Tipos de Bobinadoras

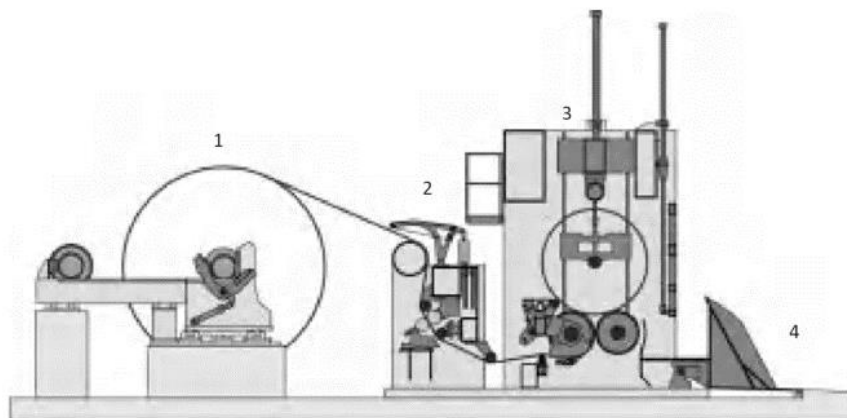
Alguns dos problemas que podem ocorrer durante o processo de rebobinagem consistem em centros macios, ruturas, ondulações, rugas, desdobraimento, poeira e faces concavas ou convexas [47]. A ocorrência desses defeitos em diferentes tipos de papel exige que as bobinadoras sejam ajustadas conforme o seu uso específico, sendo apresentados a seguir os principais tipos de bobinadoras e suas adaptações para cada tipo de papel [47].

- Bobinadoras Clássicas de Dois Tambores – Classificadas como a primeira escolha em bobinadoras, utilizam tensão e torque para controlar o processo de enrolamento, adequadas para vários tipos de papel, como papel de cigarro e *kraftliner*,
- Bobinadoras Modificadas de Dois Tambores – Superam limitações das Bobinadoras clássicas, adequadas para tipos como cartão revestido e papel jornal.
- Bobinadoras de Dois Tambores com Alívio de Ar e Suporte de Correia – Essas adaptações visam diminuir a pressão sobre o rolo de papel, sendo usados para rolos delicados ou de alto peso, que precisam de uma forma de manuseio específica para se evitar problemas nas etapas seguintes.
- Bobinadoras de Tambor Único – Trabalha com dois rolos de papel ao mesmo tempo. Cada rolo é suportado por um tambor central comum, ideal para papéis de alta densidade e superfícies sensíveis.

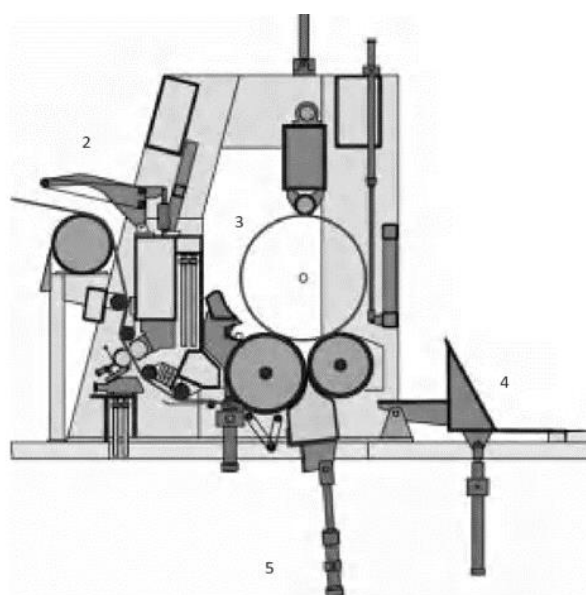
Cada tipo de bobinadora possui benefícios para diferentes tipos de papel, conforme visto anteriormente. Estes benefícios são obtidos por meio de modificações no equipamento que alteram parâmetros de operação envolvidos na criação das bobinas, como o peso dos rolos, o torque do equipamento, e a carga de *NIP*, esta definida pela força ou pressão aplicada no ponto de contato entre dois rolos (ou cilindros) em uma máquina de papel [47].

A Figura 5.5 exhibe diferentes representações das bobinadoras descritas anteriormente, nas quais podem-se observar as diferentes estruturas responsáveis pelo corte de papel e formação dos rolos. Em cada figura, tem-se:

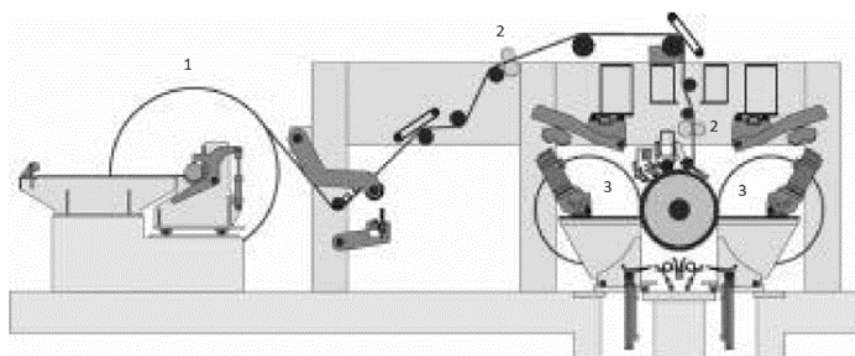
1. Estação de desenrolamento.
2. Estação ou zona de corte.
3. Estação de rebobinagem.
4. Plataforma de abaixamento de bobinas.
5. Suportes de ar comprimido, presentes nas bobinadoras com Alívio de Ar.



a)



b)



c)

Figura 5.5 – Diferentes bobinadoras a) Clássica de dois tambores, b) com suporte de ar e c) de tambor único, adaptadas com a indicação numérica de cada estação [47]

## 6 ESTUDO DE CASO

Conforme discutido anteriormente, os conceitos de Manutenção Condicionada representam o que há de mais avançado na área de manutenção. Os investimentos em *hardware* e *software* essenciais para a implementação eficaz de uma rotina de manutenção condicionada podem ser significativos, exigindo, portanto, uma análise criteriosa para determinar os próximos passos.

A adoção da Manutenção Condicionada não só melhora a eficiência dos processos de manutenção, mas também contribui para a longevidade dos equipamentos e a redução de custos operacionais a longo prazo. A aplicação dessas tecnologias permite uma monitorização contínua e precisa, identificando possíveis falhas antes que ocorram, o que minimiza o tempo de inatividade e otimiza os recursos disponíveis.

### 6.1 Sobre a Empresa

A empresa analisada possui uma longa tradição na indústria papeleira. Embora os custos de manutenção nas linhas de produção representem um desafio, a organização segue comprometida com a inovação. Esse cenário impulsiona a busca contínua por alternativas que otimizem os custos, visando aumentar a eficiência e a competitividade no mercado.

Para manter a sua posição de destaque no mercado e garantir a sustentabilidade a longo prazo, a empresa está continuamente a atualizar os seus processos e a adotar tecnologias modernas. Neste contexto foi proposto um estudo para avaliar a viabilidade de implementar um algoritmo de Manutenção Condicionada, com o objetivo de calcular a Vida Útil Remanescente (RUL) de um dos equipamentos. A expectativa é que a experiência adquirida com esse equipamento possa ser aplicada a outros na linha de produção, estabelecendo um programa de manutenção abrangente e eficiente.

### 6.2 Sobre o Equipamento

O equipamento em análise é uma bobinadora de papel de dois tambores. Optou-se por este modelo devido à sua relativa compatibilidade em comparação com outros presentes nas linhas de produção, além de dispor de uma base de dados considerável de sinais de vibração, o que amplia as possibilidades do estudo proposto. Conforme mencionado anteriormente, a bobinadora faz parte da etapa final da linha de produção de papel, onde as bobinas são divididas em tamanhos menores, de acordo com as necessidades e especificações dos clientes.

A Figura 6.1 apresenta uma visão esquemática das principais partes de uma bobinadora similar à do caso de estudo, enquanto a Tabela 6.1 possui o descritivo geral de cada elemento. As informações foram disponibilizadas pela empresa.

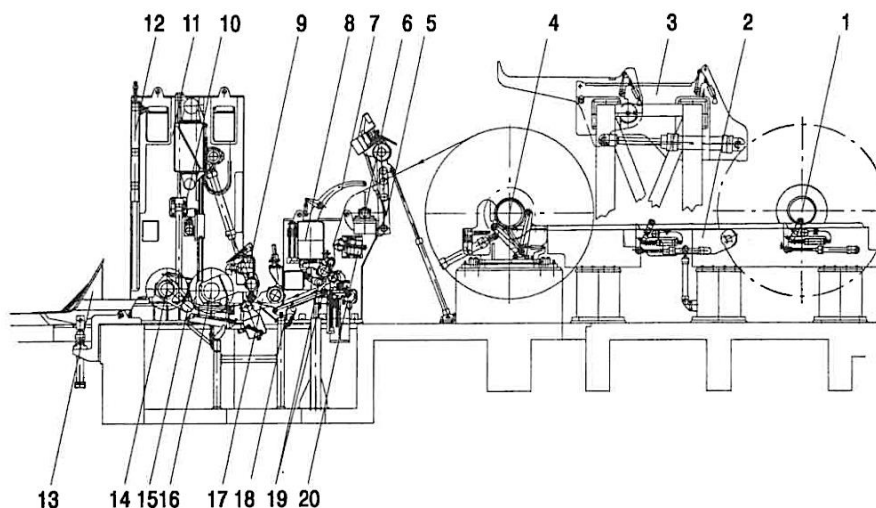


Figura 6.1 – Desenho esquemático de uma bobinadora de dois tambores

Tabela 6.1 – Descritivo dos equipamentos indicados na Figura 6.1

Item	Descritivo
1. Stop 1	Ponto de paragem inicial do sistema, utilizado para controlar o início do processo de desbobinagem.
2. Ponte de passagem com Stop 2	Ponte que permite a passagem com um segundo ponto de paragem, proporcionando segurança e controle adicional durante a desbobinagem.
3. Dispositivo de Elevação de Tambor	Equipamento utilizado para desenrolar as bobinas de papel, essencial no início do processo de rebobinagem.
4. Desbobinagem	Refere-se ao processo completo de desenrolar as bobinas de papel.
5. Sistema de Emenda ( <i>Splice System</i> )	Sistema de emenda que une as extremidades da banda de papel, permitindo uma transição contínua entre bobinas.
6. Cilindro-guia de um Elemento (Ø850 mm)	Cilindro que guia a banda de papel, garantindo que ela siga o caminho correto durante o processo de rebobinagem.
7. Unidade de Entrada da Banda de Papel 1 com Unidade de Prensagem	Primeira unidade de entrada para a banda de papel, equipada com um sistema de prensagem para manter o papel fixo e plano.
8. Dispositivo de Corte	Equipamento utilizado para cortar a banda de papel conforme necessário, especialmente durante as trocas de bobinas.
9. Dispositivo de Ejeção de Bobinas e de Introdução de Tubetes	Mecanismo que remove as bobinas acabadas e introduz novos tubetes para continuar o processo de rebobinagem.

10. Carro para o Guia do Tubete	Carro que movimenta o guia dos tubetes, posicionando-os corretamente para iniciar uma nova bobina.
11. Carro para o Cilindro de Carga	Carro que movimenta o cilindro de carga para diferentes posições conforme necessário durante o processo.
12. Dispositivo de Segurança Abaixável	Sistema de segurança que pode ser baixado para proteger os operadores, impedindo o acesso à área de bobinagem enquanto a máquina está em operação.
13. Plataforma de Abaixamento de Bobinas	Plataforma utilizada para baixar e permitir a saída das bobinas de papel ejetadas.
14. Cilindros de Carga 1	Cilindros ranhurados que seguram a banda de papel cortada durante a troca automática das bobinas. Esses cilindros são essenciais para iniciar o processo de rebobinagem.
15. Unidade de Prensagem	Unidade que aplica pressão na banda de papel para mantê-la fixa e plana, garantindo que o papel esteja em condições ideais para ser rebobinado.
16. Cilindros de Carga 2	Cilindros com revestimento de tungstênio-carbono-níquel, que proporcionam a aspereza necessária para o processo de bobinagem e ajudam a controlar a densidade da bobina.
17. Unidade de Separação de Banda de Papel	Unidade que separa a banda de papel em diferentes seções, facilitando a bobinagem das bobinas de papel.
18. Unidade de Entrada da Banda de Papel	Segunda entrada para a banda de papel, que direciona o papel cortado para os cilindros de carga.
19. Cilindro-guia de Múltiplos Segmentos (Ø174 mm)	Cilindro composto por múltiplos segmentos, utilizado para guiar a banda de papel cortada na área das facas, antes da rebobinagem final.
20. Flexiroll 1 (Ø198 mm)	Cilindro flexível que ajuda a ajustar a banda de papel e garantir que ela esteja plana antes da bobinagem. Ele utiliza múltiplos segmentos para influenciar a tensão e a planicidade da banda de papel.

### 6.3 Rotina de Manutenção

A rotina de manutenção da bobinadora envolve várias etapas planeadas para garantir a operação eficiente e segura do equipamento, conforme representado na Figura 6.2.

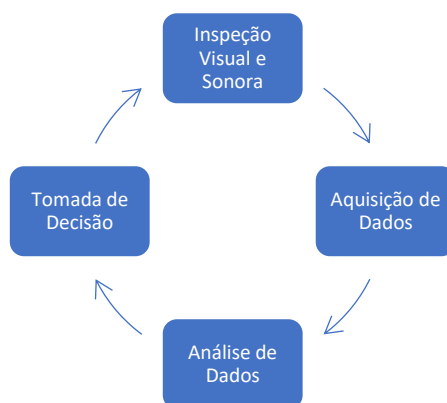


Figura 6.2 – Etapas da rotina de manutenção da bobinadora

A seguir, detalha-se cada uma dessas etapas.

### 6.3.1 Inspeção Visual e Sonora

A inspeção visual e sonora tem por objetivo a detecção precoce de possíveis problemas no equipamento. A inspeção visual inclui a verificação da estrutura do equipamento, como apertos e fissuras, enquanto a inspeção sonora, mesmo com o uso de protetores auriculares por segurança, permite identificar anomalias sonoras que possam significar desgastes ou desníveis no equipamento. Ferramentas especiais, como estetoscópios, são também utilizadas para detetar ruídos incomuns.

### 6.3.2 Aquisição de Dados

A aquisição de dados vibratórios é realizada de duas formas: *offline* e *online*.

#### 5. Aquisição *Offline*:

- a. Equipamentos Utilizados - *Microlog Analyzer* (AX, GX, dBX) e *Enlight Pro Collect*,
- b. Frequência - Realizada em intervalos irregulares, com os dados *offline* sendo utilizados para validar as medidas *online* em casos de incerteza.

#### 6. Aquisição *Online*:

- a. Equipamentos Utilizados - *IMx-8/IMx-16 Plus* e *Enlight Collect IMx-1*.
- b. Frequência - Ocorre diariamente, com coleta contínua 24/7. Apenas uma medida por dia é armazenada, além de medições adicionais em caso de alterações no estado do equipamento, conforme descrito posteriormente.

A Figuras 6.3a e 6.3b apresentam pontos de medição em um motor elétrico e em uma caixa redutora, respetivamente.



Figura 6.3 - Medidas de vibração efetuadas em: a) um motor elétrico; e b) uma caixa redutora

### 6.3.3 Análise de Dados

O processo de análise consiste no diagnóstico das medidas recolhidas para identificar anomalias, sendo essencial para a tomada de decisões.

A principal ferramenta utilizada nesta etapa é o SKF *@ptitude Analyst*. Esta ferramenta fornece dados num formato relativamente "cru", permitindo uma análise profunda e detalhada. No entanto, a sua *interface* não é muito amigável, o que exige que os operadores tenham um conhecimento técnico avançado para interpretar os resultados adequadamente. Utilizando o SKF *@ptitude Analyst*, os analistas responsáveis estudam os espectros vibratórios do equipamento para identificar possíveis problemas, garantindo uma avaliação precisa das condições operacionais e facilitando a deteção precoce de anomalias.

O seguinte exemplo expõe de forma simples este processo. As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam um historial de leituras de vibração referente a uma das bombas do equipamento estudado. Pode-se observar que, por volta de abril de 2024 houve uma maior presença de picos de RMS, o que pode significar a existência de avarias mecânicas.

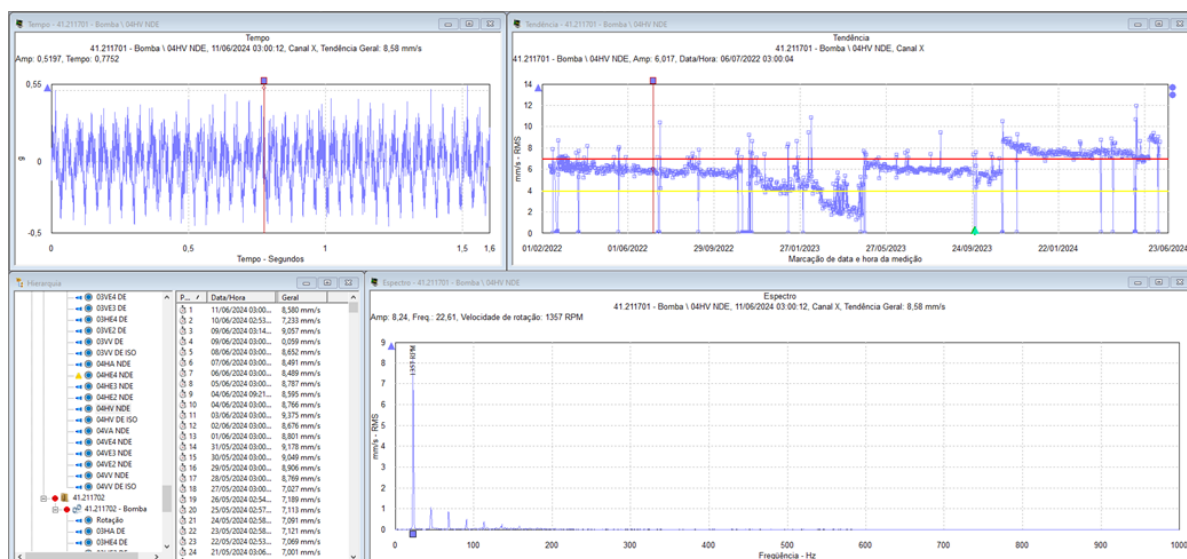


Figura 6.4 - Visualização de um padrão vibratório com presença de falha

Após o estudo do equipamento pela equipa de campo, que levou em consideração o historial do equipamento em conjunto ao *know-how* do analista e dos técnicos de manutenção, concluiu-se que o motivo para estas alterações seria a presença de um parafuso desapertado, conforme mostrado na Figura 6.5.



Figura 6.5 - Localização de parafuso desapertado

Por medida de segurança, detalhes acerca da metodologia de análise de dados utilizada atualmente na empresa serão ocultados.

### 6.3.4 Tomada de Decisão

A tomada de decisão pode levar a dois tipos de ações: a realização de novas medidas e a execução de reparações ou substituições. Primeiramente, novas medidas podem

ser necessárias, uma vez que medidas incorretas podem ocorrer durante o processo de obtenção de dados, comprometendo a precisão e a eficácia das ações subsequentes. Em segundo lugar, reparações ou substituições podem ser imprescindíveis para corrigir erros identificados ou para atualizar componentes obsoletos.

A análise utiliza um histórico de cinco anos de dados para comparar e validar novas medições. O sistema *online* recolhe dados continuamente, mas armazena apenas uma medida por dia em horários específicos e durante mudanças de estado. Quando uma medida em *loop* ou uma alteração de estado é detetada, o sistema regista-a. O *software* permite a visualização de medidas ao vivo e o armazenamento das necessárias, com limites de medidas por minuto:

- Medidas Incorretas - Normalmente apresentam-se na forma de *skislopes*, são causadas por sensores ou cabos avariados, ou pela aquisição de dados no exato momento em que o acelerómetro está a ser encostado. Tais erros são mais frequentes em sistemas *online*. Ao verificar-se uma medida deste tipo, o analista procede com o registo da leitura dos sensores *offline* e leva-os em consideração no lugar da medida incorreta para determinar o estado da máquina;
- Necessidade de Relubrificação - A necessidade de relubrificação do equipamento é indicada pelo tipo de espectro e pelo ruído gerado. Um espectro que sugere a necessidade de lubrificação gera ruído sem uma frequência definida, relacionado com a aceleração e a velocidade. Nesses casos, o analista solicita à equipa de manutenção uma reposição de óleo pontual no local onde a medida foi obtida, procedendo-se de seguida com a obtenção de uma nova medida.

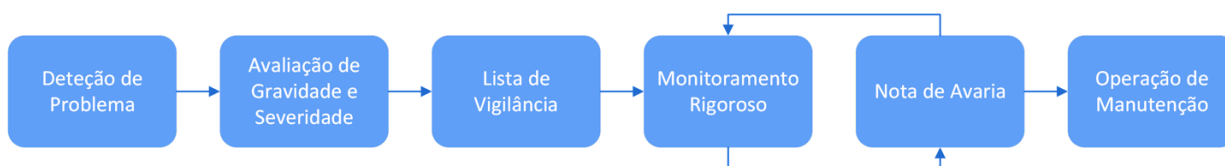
Além da relubrificação, a tomada de decisão pode resultar na substituição direta da peça com falha ou, quando isso não é viável, no estabelecimento de ações de acompanhamento e vigilância. Quando um problema é identificado, várias etapas específicas são seguidas para assegurar a operação eficiente e segura do equipamento. Essas ações incluem medidas corretivas baseadas na análise detalhada dos dados e no histórico de manutenção, garantindo uma abordagem proativa na gestão do equipamento, conforme detalhado a seguir.

#### **6.4 Ações de Monitorização**

Quando a análise dos dados identifica um problema e a substituição do equipamento de imediato não é possível, é estabelecida a monitorização próxima dos equipamentos, de forma a acompanhar-se periodicamente a evolução dos problemas até que haja a possibilidade de um trabalho de manutenção, condicionado de acordo

com a existência de paragens do equipamento e/ou a disponibilidade de peças ou equipamentos de substituição em stock.

A Figura 6.6 mostra um resumo das ações descritas a seguir.



**Figura 6.6 - Ações de monitorização**

#### **6.4.1 Detecção de Problema**

A deteção de um problema ocorre quando, durante as atividades de análise previamente executadas, são observadas alterações significativas nos parâmetros de vibração estudados. Estas alterações podem indicar a presença de condições adversas no equipamento, sugerindo que, sem o devido tratamento, o equipamento possa sofrer uma falha total.

#### **6.4.2 Avaliação da Gravidade e Criticidade**

De seguida à deteção, o problema é analisado de forma a definir-se a sua gravidade e Criticidade, como segue:

- Gravidade - Refere-se à extensão ou seriedade do problema detetado, medida pelos parâmetros de vibração, como velocidade e aceleração filtrada (gE). Esta medida ajuda a identificar a gravidade do problema;
- Criticidade - Está relacionada com as consequências de uma falha e às dificuldades envolvidas na reparação do equipamento. Isto envolve uma análise das implicações operacionais e dos custos associados à falha do equipamento.

Esta categorização ajuda a priorizar os recursos de manutenção e a resposta às falhas potenciais, garantindo que os equipamentos mais críticos recebam a atenção necessária.

Os equipamentos são classificados em quatro categorias com base na avaliação combinada de gravidade e criticidade, esta feita de acordo com a experiência e *know-how* do analista de dados, com *inputs* e validações da equipa de Manutenção:

1. Vital
2. Crítico

3. Importante
4. Secundário

Ainda há a possibilidade de alterações na frequência de medição em casos de incerteza ou falta de dados históricos. Por exemplo, medições que normalmente são feitas mensalmente podem passar a ser semanais em casos suspeitos, e problemas críticos podem ser monitorizados com ainda mais frequência, conforme a avaliação do analista.

Assim, para equipamentos críticos, um sistema de monitorização frequente pode ser instalado para medições mais frequentes, permitindo uma resposta rápida a quaisquer alterações na condição do equipamento. Equipamentos menos críticos podem ser monitorizados com menor frequência, mas ainda de forma regular para garantir a deteção precoce de problemas potenciais.

#### 6.4.3 Lista de Vigilância e Monitorização Rigorosa

A depender da gravidade e criticidade do problema encontrado, os equipamentos podem ser colocados numa lista de vigilância, onde recebem atenção especial.

Conforme visto anteriormente, as etapas para obtenção de dados podem ser descritas como segue:

1. Realizam-se medições diárias para rolos maiores, sempre durante a madrugada e através dos sensores *online*;
2. Se problemas são detetados nestas medidas, sensores *offline* espalhados pela bobinadora são utilizados para investigações adicionais;
3. Se um problema é confirmado com sensores *offline*, a monitorização rigorosa pode ser ativada para o equipamento depender dos parâmetros de criticidade e gravidade;
4. Se o equipamento é considerado "OK", os sensores *offline* são verificados apenas periodicamente (semanalmente, mensalmente, bimestralmente, trimestralmente).

Assim, se um defeito não mostrar evolução significativa ou não tiver um alto impacto, a monitorização padrão é mantida.

No entanto, se forem detetadas assinaturas de vibração elevadas ou variações severas, a monitorização rigorosa é adotada, podendo ser classificada em três categorias:

1. Vigilância 1 (V1) - 1 medição por semana;
2. Vigilância 2 (V2) - 2 medições por semana;

3. Crítico - A frequência de medição é determinada pelo analista conforme necessário para monitorização adequada.

O Anexo 1 contém uma representação de uma Lista de Vigilância. Nota-se, também, a presença de tendências, fruto das análises realizadas de acordo com cada medição verificada no cronograma mencionado anteriormente.

#### **6.4.4 Nota de Avaria**

As notas de avaria são relatórios detalhados que documentam a evolução do problema. Disponíveis no ERP da empresa, elas servem para comunicar eficientemente a situação e planejar ações corretivas.

O relatório inclui informação sobre o equipamento, tipo de dano, gravidade do problema e as ações tomadas ou necessárias para reparação. Essa informação torna-se crucial no planejamento de ações de manutenção.

#### **6.4.5 Operação de Manutenção**

A partir da informação elencada nas notas de avaria e demais fatores, tais como a disponibilidade de stock e planejamento de paragens, é definido o cronograma e planejamento da execução das operações de manutenção.

### **6.5 Dados de Manutenção**

Além da monitorização de vibrações, para o qual a gestão foi discutida anteriormente, a empresa possui informação sobre as rotinas de lubrificação da bobinadora:

- Monitorização de Vibrações - Há uma equipa terceirizada residente na fábrica responsável pela recolha e interpretação dos dados de vibração. Eles utilizam software de apoio e histórico para auxiliar na análise dos dados. A medição de vibração é utilizada como uma ferramenta fundamental para a análise de outros indicadores;
- Lubrificação - A máquina possui pontos de lubrificação específicos, que são mantidos de acordo com a rotina estabelecida no manual. A reposição e troca de óleo podem ser realizadas de forma centralizada ou por um técnico de campo, dependendo do local onde o trabalho será executado.

#### **6.5.1 Gestão dos Dados**

Verificou-se que os dados produzidos durante a operação do equipamento podem ser encontrados em três formatos diferentes, a depender do departamento que os utiliza:

- Sistema APM (*Asset Performance Management*) - Este é o núcleo dos sistemas de manutenção, registando informação sobre notas de avarias, sistemáticas, vibrações, sensores genéricos e lubrificação. À meia-noite de cada dia é gerado um arquivo base para atualização dos *dashboards*, que exibem os dados para análise integrada de informação com indicadores de lubrificação e análise de óleos;
- Sistema PPMS (*Production Performance Management System*) - Este sistema regista os dados de produção, desde a entrada até a saída. Há uma comunicação entre a máquina e o PPMS sempre que um conjunto de bobinas é produzido. As variáveis registadas incluem produção, torques dos motores, velocidade, pressão, gramagens, dimensões, diâmetros e larguras das bobinas;
- Dados Locais - Informação gerada localmente no *software* de controlo da bobinadora, que podem ou não estar disponíveis no PPMS. Algumas dessas informações podem ser exportadas em formato .CSV.

A diversificação na distribuição dos dados implica diferentes níveis de restrição de acesso. Os dados do APM são de fácil acesso, visto que o trabalho é executado no departamento de Manutenção, responsável pelo sistema. Entretanto, o acesso aos dados do PPMS pode ser mais restrito, pois contém informação confidencial relacionada com a produção e de cunho comercial. O acesso aos dados locais é feito diretamente na sala de controlo da máquina.

### 6.5.2 Base de Dados

A base de dados fornecida para o estudo abrange cinco anos de leituras de sensores vibratórios, totalizando cerca de 45 mil registos.

A análise preliminar dessa informação, realizada em conjunto com a equipa de campo responsável pela análise dos equipamentos, permitiu inferir a seguinte informação inicial:

- Existem 103 sensores distribuídos em 28 equipamentos, incluindo motores, redutores, ventiladores, chumaceiras e rolos;
- Os sensores são identificados de acordo com sua localização no equipamento, podem ser tanto *offline* quanto *online* e medem RMS e Velocidade de Rotação. Medidas de envelopamento, caracterizadas como Pico e Pico a Pico, são interpretadas como novos sensores na base de dados, pois estão separadas das medidas RMS que as originaram:
  - As leituras dos sensores *online* ocorrem entre 23h40 e 2h da manhã. Estas leituras não consideram o estado atual do equipamento, podendo

estar em funcionamento ou parado, o que pode resultar em variações nas representações gráficas desses sensores.

- Para sensores *offline*, é obtida uma leitura a cada 15 dias, manualmente pelo analista de campo. As medidas são facilmente auditáveis, pois há atenção ao estado do equipamento e às condições de funcionamento para que as medições sejam efetuadas em condições ideais. Também há sensores *offline* utilizados de prova dos sensores *online*, para os quais são obtidas medidas sempre que há dúvidas sobre as medidas automáticas obtidas para o equipamento em análise para além da medida a cada 15 dias.
- As medições de vibração refletem dados instantâneos, apresentados em termos de amplitude e frequência. Essas medições são posteriormente utilizadas em análises, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT), para decomposição e interpretação dos dados.
- A técnica de detecção de envelope é projetada para extrair sinais específicos (por exemplo, defeitos em rolamentos) ao filtrar ruídos de baixa frequência. Este processo é uma forma de processamento de sinal aplicado após a captura dos dados brutos pelo sensor, onde a análise e a filtragem subsequentes são realizadas para identificar padrões ou falhas.
- As medições também são afetadas por fatores externos, como os mandris que saltam durante certos fluxos de trabalho, causando deformações nas medidas analisadas.

Por fim, observa-se que a base de dados está dividida de acordo com os sinais medidos em cada ponto de medição, conforme mostrado no Anexo 2.

Após essa análise preliminar, a base de dados é examinada para identificar os seguintes pontos:

- Tipo de medida;
- Identificação do equipamento e tipo de equipamento onde o sensor está localizado;
- Determinação se a medida pertence a uma das três categorias: *online*, *offline* complementar ao *online*, ou *offline* independente.

Finalmente, utilizando a função *describe* em Python e uma breve formatação em Excel, é gerado o relatório anexo, que contém a descrição detalhada da informação obtida de cada sensor de vibração, reproduzidas no Anexo 3.

Referente às rotinas de lubrificação, a informação está disponível em relatórios extraídos diretamente do sistema em formato PDF, sendo este um dos pontos pendentes de integração ao sistema APM. A base de dados de lubrificação é dividida por semanas e inclui informação sobre as atividades de lubrificação, o tipo e a quantidade de óleo utilizados, totalizando 2442 leituras. Espera-se visualizar uma correlação entre a atividade de lubrificação e a *performance* do equipamento e longevidade da vida útil.

## 6.6 Conclusões Iniciais

Conforme pode ser verificado no Anexo 3, os sensores “*online*” apresentam uma média de duas mil medições por sensor no espaço estudado dos últimos cinco anos, enquanto os ditos “*offline*” em grande maioria possuem menos de cem medições. De posse da informação e tendo conhecimento das rotinas de manutenção descritas anteriormente, foram tiradas as seguintes ilações:

- Quantidade de Dados - Com cerca de duas mil leituras por sensor *online* em cinco anos, conclui-se que a frequência de recolha de dados é demasiado baixa, especialmente se considerarmos que essa quantidade representa pouco mais de uma leitura por dia, uma vez que há aproximadamente 1825 dias em cinco anos. A baixa quantidade de dados é um obstáculo significativo para o desenvolvimento de um algoritmo de prognóstico eficaz, pois modelos preditivos requerem grandes volumes de dados para treino e validação. Nota-se que o atual sistema da empresa possui capacidade de armazenamento de medidas em maior volume; entretanto esta capacidade só é utilizada quando o mesmo entra em monitorização crítica, nos moldes discutidos anteriormente;
- Qualidade e Relevância dos Dados - A recolha de apenas uma medida durante a noite, sem considerar se o equipamento está ligado ou desligado, compromete a relevância dos dados. Para o desenvolvimento de um algoritmo de prognóstico, é crucial que os dados representem fielmente as condições operacionais do equipamento. Medidas que não levam em conta o estado operacional podem não fornecer informação útil para prever falhas ou evitar manutenções necessárias.
- Consistência e Regularidade das Medidas - A ausência de medições consistentes e regulares ao longo do tempo para ambos os tipos de sensores *Online* e *Offline* pode dificultar a identificação de padrões e tendências necessários para o prognóstico. Idealmente, os dados devem ser recolhidos de maneira contínua ou em intervalos regulares para capturar todas as variações operacionais do equipamento, um problema que afeta diretamente os sensores ditos *offline*, com medidas ocasionais. Além disso, como os sensores fornecem leituras instantâneas, sem processamento inteligente para calcular médias ou

resumos ao longo do tempo, a análise histórica torna-se ainda menos eficaz para avaliar o estado do equipamento a longo termo.

- Contexto Operacional - A falta de informação sobre o contexto operacional durante as medições (ou seja, se o equipamento estava funcionando ou não, ou o motivo de uma medida *offline* ter sido executada) torna difícil correlacionar os dados com os eventos de falha ou desempenho. Algoritmos de prognóstico precisam dessa correlação para prever com precisão quando uma falha pode ocorrer ou quando a manutenção é necessária.

Com base nesses pontos, o estudo, nas condições descritas, apresenta desafios significativos para o desenvolvimento de um algoritmo de prognóstico eficaz. A falta de dados suficientes, a baixa frequência de recolha e a ausência de informação contextual limitam a capacidade de criar um modelo preditivo preciso.

Observa-se que o sistema utilizado na empresa está voltado e adaptado para atividades de diagnóstico, focando na identificação e acompanhamento do desenvolvimento de problemas. Nesse contexto, nota-se a existência de fluxos de trabalho não documentados numericamente, como a relubrificação de equipamentos quando são encontradas medidas suspeitas e a medição irregular de sensores offline para corrigir medidas consideradas incorretas. Esses fluxos prejudicam a correta identificação de padrões necessária para um algoritmo de prognóstico, pois as intervenções locais não catalogadas afetam o comportamento da máquina, apesar de atenderem bem às necessidades de diagnóstico.

Assim, a implantação de um algoritmo de manutenção condicionada para este equipamento enfrenta dificuldades substanciais, exigindo extensas inserções manuais para replicar o modo de trabalho dos analistas de campo. Isso não só contraria a natureza autodidata das técnicas de *Machine Learning*, como também compromete a precisão da informação fornecida pelo algoritmo, tornando-o inviável nas condições atuais dos dados.

## 6.7 Recomendações

A empresa executa uma rotina de diagnóstico robusta e eficiente, considerando a longa experiência na aplicação dessa prática. No entanto, ao concentrar-se exclusivamente no diagnóstico de problemas e no seu acompanhamento, a empresa acaba por negligenciar o desenvolvimento de uma metodologia de prognóstico.

Enquanto o diagnóstico permite identificar e corrigir problemas já existentes, o prognóstico oferece a capacidade de prever falhas futuras e implementar ações preventivas, reduzindo o tempo de inatividade não planejado e otimizando a utilização dos recursos.

A transição para um algoritmo de prognóstico exige uma estrutura dedicada à recolha e armazenamento de dados, além de rotinas claras para garantir a correlação completa entre o comportamento da máquina e os dados obtidos, tanto no momento da análise quanto a longo prazo. Com essa informação é possível prever falhas iminentes e tomar medidas corretivas antes que ocorram, resultando numa manutenção mais eficiente e económica, reduzindo custos operacionais e aumentando a fiabilidade dos equipamentos.

A futura implantação de um sistema de manutenção condicionada para este equipamento deve considerar os objetivos definidos nas seções seguintes.

#### **6.7.1 Aumento na Frequência de Recolha de Dados**

A literatura revista não oferece recomendações específicas sobre a frequência ideal de medições para um determinado equipamento. No entanto, é observado que, devido às diversas especificidades e ao funcionamento contínuo do equipamento em questão, uma estimativa razoável da frequência ideal de medição deve situar-se entre medições constantes e a cada hora.

Desta forma, recomenda-se a execução de um estudo no sentido de se determinar a melhor frequência de recolha para ter-se o melhor custo-benefício no registo de informação sobre o equipamento e a operacionalização de uma solução capaz de obter uma estimativa de RUL.

#### **6.7.2 Integração de Dados**

Atualmente, o sistema de manutenção da empresa está passando por um processo de unificação em uma solução de Gestão de Ativos de Performance (APM), conforme discutido anteriormente. Essa solução de APM visa consolidar diversos aspetos da manutenção numa plataforma coesa, proporcionando uma visão holística dos indicadores de manutenção.

Para além destes é essencial que uma aplicação de prognóstico também integre os dados de produção. Esses dados, presentes no Sistema de Gestão de Produção (PPMS), incluem variáveis cruciais como produção, torques dos motores, velocidade, pressão, gramagens, dimensões, diâmetros e larguras das bobinas, como visto anteriormente.

A integração desses dados de produção na solução APM permitirá uma análise mais abrangente e precisa, tanto pela criação de *dashboards* com informação em tempo real quanto pela construção de uma base de dados a alimentar um algoritmo de *Machine Learning*, entre outras soluções para análise. Isso ajudará a identificar padrões e tendências que podem melhorar a eficiência operacional e a tomada de decisões, além de permitir uma estimativa de RUL ainda mais precisa ao integrar o estado atual do equipamento em sua configuração de manutenção e o efeito destes a

longo prazo. Pode-se, ainda, obter parâmetros de configuração otimizados através da análise das referidas tendências, de modo a maximizar-se a RUL.

Por fim, a incorporação de dados contextuais sobre o estado operacional do equipamento às bases de dados de vibração, como ligado ou desligado, carga de trabalho, condições gerais, etc. podem ser uma alternativa à revisão de medidas consideradas incorretas, sendo estas assinaladas diretamente nas bases de dados e desconsiderada em conformidade, evitando-se a aplicação de rotinas manuais.

### **6.7.3 Melhoria Geral na Qualidade dos Dados**

A qualidade dos dados fornecidos também pode ser melhorada de diversas formas, especialmente no que diz respeito a precisão e fiabilidade. Por exemplo, os dados de Lubrificação foram encaminhados em formato .pdf, o que acaba por dificultar análises em continuidade. Para este caso em específico, a empresa já apresenta solução através da integração da informação em APM; entretanto ainda sem fiabilidade.

Sabe-se que a diminuição de intervenções manuais na obtenção de dados acaba por aumentar a qualidade dos mesmos na medida em que a probabilidade de erro humano é minimizada e a velocidade de obtenção otimizada. Desta forma, recomenda-se a automatização de medidas de sensores *offline* e sua harmonização aos sensores *online* numa futura intervenção nos sistemas de manutenção da empresa. A limpeza dos dados dar-se-ia através de algoritmos específicos, de forma a manter-se a análise na mesma plataforma.

### **6.7.4 Revisão na Infraestrutura de Dados**

A presença de medições de sensores num contexto limitado leva a crer que a rede de dados da empresa possui deficiências de capacidade e transmissão, o que pode vir a tornar-se um problema crítico na implantação de uma metodologia de prognóstico, que depende da construção e gestão de grandes bases de dados para obtenção de resultados satisfatórios.

O primeiro ponto a ser analisado é a capacidade do servidor ou computador disponível para o tratamento desses dados. Este equipamento deve ser capaz de armazenar e processar grandes volumes de informação, garantindo que as análises preditivas possam ser realizadas de forma eficiente e em tempo útil. Devem ser consideradas também soluções de armazenamento em nuvem.

Em seguida, o desenvolvimento de uma rede de internet de alta velocidade e baixa latência mostra-se necessária para a transmissão de dados em larga escala. Esta rede servirá para conexão *online* dos sensores presentes no equipamento e transmissão automática de dados, sem a necessidade de rondas de medição.

Os sensores utilizados também precisariam de uma revisão, dada a necessidade de conexão para transmissão de dados. Idealmente, a conexão dos sensores seria dada por fios, de forma a garantir a maior velocidade e fiabilidade possíveis. Entretanto esta conectividade está limitada à inconveniência da instalação de metros de fios, o que poderia ser evitado por meio de sensores conectados via *WiFi*. A utilização de sensores ligados diretamente a uma plataforma de gestão de dados consiste numa inteligente solução de IoT com a possibilidade da monitorização em tempo real do equipamento através de *dashboards* e a utilização de algoritmos de *Machine Learning* para cálculo da RUL.

A adoção de IoT não só aumentaria a precisão e a fiabilidade dos dados, mas também permitiria a criação de uma base de dados robusta e contínua, essencial para análises preditivas e tomadas de decisão mais informadas, além de evitar toda a rotina de levantamento de dados descrita nas seções anteriores.

#### **6.7.5 Utilização de Técnicas de *Machine Learning***

Ao focar-se exclusivamente nos dados extraídos no momento e consultar a base de dados ocasionalmente para aferição das medidas, a equipa de campo atual depende fortemente do analista de dados. No entanto, o contexto atual aponta para a automação de muitas dessas funções por meio de técnicas de *Machine Learning*, sendo essa a principal tendência na área. A recolha de medidas adicionais permitirá a incorporação dessas técnicas na rotina de diagnóstico, possibilitando a deteção de falhas com antecedência e precisão acentuadas.

O Estado da Arte apresenta diversos exemplos de técnicas utilizadas em Diagnóstico, como as Redes Neurais Artificiais (ANNs) e Redes Neurais Convolucionais (CNNs), com bibliografia disponível para consultas sobre as melhores formas de implantação desses sistemas. Acredita-se que o uso dessas técnicas seja naturalmente adaptável à implantação de metodologias de Prognóstico, já que são os mesmos modelos aplicados em contextos diferentes.

Os benefícios dessa adoção incluem uma maior precisão na deteção de falhas, redução de custos operacionais e aumento da eficiência geral dos processos. A automação e o uso de *Machine Learning* também liberam a equipa de campo para focar em atividades mais estratégicas, aumentando a produtividade e a qualidade do trabalho realizado.

## 7 ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA

Como mencionado anteriormente, a viabilidade da implementação de uma rotina de CBM envolve uma série de fatores que tornam a justificação financeira para a sua adoção uma tarefa desafiadora. É essencial ter conhecimento dos custos envolvidos ou, alternativamente, possuir uma excelente capacidade de estimá-los, para que se possa obter informação suficientemente precisa para uma tomada de decisão informada.

No caso da bobinadora analisada anteriormente, a informação disponível sobre as rotinas de manutenção não foi suficiente para realizar essa estimativa de maneira adequada, de forma a verificar-se a viabilidade da implementação do prognóstico num projeto futuro. Isso deve-se, em parte, à falta de conhecimento detalhado sobre alguns dos valores envolvidos e, possivelmente, ao sigilo na partilha desses dados para fins académicos, devido ao seu impacto potencial num mercado altamente competitivo, como é o setor papeleiro europeu.

No entanto, sabe-se que a rotina de manutenção descrita para esse equipamento é realizada por uma equipa de quatro pessoas, que levam entre seis e oito horas para completar uma rota de recolha e análise de informação para toda a linha de papel. Estimando-se um tempo médio diário de cinquenta minutos para o levantamento de informação e análise de dados especificamente relacionados com a bobinadora em questão, e supondo que essa equipa é composta por um engenheiro de manutenção e três técnicos, em que apenas um destes trabalha em exclusividade para o equipamento, é relativamente simples calcular o número anual de horas trabalhadas e os custos de manutenção, utilizando os salários médios portugueses para essas funções.

Ao estimar também outros valores, como o investimento necessário e o custo de hora de paragem do equipamento, é possível seguir um modelo para obter os indicadores financeiros e avaliar a viabilidade económica do prognóstico. Serão propostos dois cenários: um positivo, onde os resultados obtidos pela implantação do prognóstico foram diretamente sentido nos principais custos de manutenção, e um negativo, no qual uma implantação trabalhosa resultou em ganhos relativamente rasos.

Desta forma, é possível a aplicação de um modelo de LCCs adaptado para se determinar a viabilidade de um projeto de prognóstico para este equipamento, este desenvolvido a seguir.

## 7.1 Premissas

Conforme discutido anteriormente, a avaliação financeira referente à implementação de uma metodologia de prognóstico na bobinadora analisada requer a estimação de valores. No capítulo 4 apresenta-se uma forma de se medir o impacto de investimentos em manutenção através das alterações percebidas nos Custos do Ciclo de Vida (LCC) de um equipamento.

Partindo-se da equação (4.1), reproduzida novamente a seguir, estimou-se através das seções seguintes os seguintes valores.

$$LCC = AC + OC + SC + UC + IL + MC + TC \quad (4.1)$$

De forma a simplificar este exercício será desconsiderado o custo de perdas indiretas,  $IL$ , e de término,  $TC$ , enquanto o custo de modificação,  $MC$ , será tratado de maneira separada para fins de comparação. Desta forma, será utilizada a seguinte equação adaptada para o LCC (7.1).

$$LCC = AC + OC + SC + UC \quad (7.1)$$

Propõe-se um modelo resumido de estimação do  $LCC$  para este equipamento centrado num ano de operação. Para tanto, serão analisados os custos afetados diretamente pela ação do Prognóstico, descartando-se ganhos indiretos em depreciação e custos de operação.

### 7.1.1 AC: custo de aquisição, vida útil, depreciação

O custo de uma bobinadora de papel pode variar desde algumas dezenas de milhares de euros a centenas de milhares, a depender de parâmetros como capacidade de produção, grau de automação e tecnologias aplicadas, conforme verificado em uma breve pesquisa nas plataformas Indiamart<sup>2</sup> e Alibaba<sup>3</sup>, bem como nos websites de empresas de referência neste ramo como Voith<sup>4</sup> e Valmet<sup>5</sup>. Considerando-se que a bobinadora em estudo pertence a uma marca europeia de referência no setor papeleiro, bem como que a mesma apresenta tecnologias relativamente modernas na sua operação, uma estimativa de preço de 200.000€ parece ser confiável.

<sup>2</sup> <https://www.alibaba.com>, acessado em 23.08.2024

<sup>3</sup> <https://www.indiamart.com>, acessado em 23.08.2024

<sup>4</sup> <https://voith.com/corp-en/papermaking/voith-winders.html>, acessado em 16.08.2024

<sup>5</sup> <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/winding/>, acessado em 23.08.2024

De acordo com as tabelas de taxas de depreciação e amortização estabelecidas pelo Decreto Regulamentar n.º 25/2009 [37], [52], este equipamento encaixa-se no Grupo 5, “Equipamentos industriais e diversos ativos”, rúbrica 0560, “Preparação e acabamento de papel”, com uma taxa de depreciação anual de 12,5%.

Considerando-se a taxa em questão num método de depreciação linear, obtém-se a depreciação anual através da equação (7.2).

$$\text{DepreciaçãoAnual} = 200.000\text{€} * 12,5\% = 25.000 \text{€}/a \quad (7.2)$$

A mesma legislação permite que a vida útil do equipamento seja ajustada conforme indicado pelo fabricante. No entanto, para fins de estimativa e utilizando a taxa mencionada, a vida útil será calculada pela equação (7.3):

$$\text{VidaUtil} = \frac{200.000\text{€}}{25.000 \text{€}/a} = 8a \quad (7.3)$$

Desta forma, obtém-se a Tabela 7.1, depreciação do equipamento ao longo da sua vida útil.

**Tabela 7.1 – Custos do Equipamento – pt. 1**

<b>Descritivo</b>	<b>Valor</b>
Custo Inicial	200.000€
Vida útil	8 anos
Depreciação anual	25.000€/a

#### 7.1.2 Custos de operação (OC), Custo de Suporte (SC) e Custo de Indisponibilidade (UC)

O equipamento estudado permanece em funcionamento durante vinte e quatro horas, à exceção de paragens planeadas ou não planeadas (imprevistas). Estimando-se um total de 25 dias durante o ano em paragens planeadas, temos um tempo de funcionamento de 340 dias por ano. Com uma produção de 500€/hora e um custo associado estimado de 10% do valor total, bem como considerando-se a existência de 50h anuais em paragens imprevistas tem-se o cálculo dos demais custos de operação conforme as equações (7.4) a (7.7).

$$\text{HorasOperacionais} = 24 \text{ h}/d * 340 \text{ d}/a = 8160 \text{ h}/a \quad (7.4)$$

$$ProduçãoTotal = 8160 h/a * 500 €/h = 4.080.000 €/a \quad (7.5)$$

$$CustosOperacionais = 4.080.000 €/a * 10\% = 408.000 €/a \quad (7.6)$$

$$CustoParagensInesperadas = 50 h/a * 500 €/h = 25.000 €/a \quad (7.7)$$

Entre trocas de motores, chumaceiras, rolos, rolamentos e outros materiais, estima-se um custo médio anual de manutenção de cerca de 40.000€ para o equipamento, pelo que se obtém a Tabela 7.2 atualizada.

**Tabela 7.2 – Custos do Equipamento – pt. 2**

<b>Descritivo</b>	<b>Valor</b>
Custo Inicial	200.000€
Vida útil	8 anos
Valor residual	20.000€
Depreciação anual	25.000€/a
Horas Operacionais	8.160h/a
Produção por hora	500€/h
Produção Total	4.080.000€/a
Custos Operacionais	408.000€/a
Custos de Manutenção	40.000€/a
Paragens Inesperadas	50h
Custo de Paragens Inesperadas	25.000€

### 7.1.3 Encargos com Pessoal (SC)

A consultora Randstad [53], uma das empresas líderes em Recursos humanos em Portugal e com vários anos de mercado, possui valores confiáveis para se definirem os ordenados médios de engenheiros mecânicos e técnicos de manutenção apresentados publicamente no seu *website*<sup>67</sup>, sendo estes os pontos de partida para a análise.

- Engenheiro Mecânico – 1.400€/mês
- Técnico de Manutenção – 1.160€/mês

Calculam-se os ordenados brutos anuais, considerando o pagamento de 14 meses, incluindo o subsídio de Natal e férias, nas equações (7.8) e (7.9):

<sup>6</sup> <https://www.randstad.pt/candidatos/carreiras/engenheiro-mecanico/>, acedido em 23.08.2024

<sup>7</sup> <https://www.randstad.pt/candidatos/carreiras/tecnico-de-manutencao/>, acedido em 23.08.2024

$$Eng = 1.400 \text{ €/m} * 14m = 19.600\text{€} \quad (7.8)$$

$$Téc = 1.160 \text{ €/m} * 14m = 16.240\text{€} \quad (7.9)$$

Com uma percentagem de 23,75% para a Segurança Social paga ao Estado, calculada nas equações (7.10) e (7.11):

$$SSEng = 19.600\text{€} * 23,75\% = 4.655\text{€} \quad (7.10)$$

$$SSTéc = 16.240\text{€} * 23,75\% = 3.857\text{€} \quad (7.11)$$

Assume-se o valor de 2% a título de seguro contra acidentes, equações (7.12) e (7.13), obtendo-se:

$$ACEng = 19.600\text{€} * 2\% = 392\text{€} \quad (7.12)$$

$$ACTéc = 16.240\text{€} * 2\% = 324,80\text{€} \quad (7.13)$$

Aplicando-se 1% a título de Fundo de Compensação de Trabalho, tem-se, equações (7.14) e (6.15):

$$FCTEng = 19.600\text{€} * 1\% = 196\text{€} \quad (7.14)$$

$$FCTTéc = 16.240\text{€} * 1\% = 162,40\text{€} \quad (7.15)$$

Por fim, considerando-se um subsídio de alimentação de 6€ por dia útil, e considerando a existência de 250 dias úteis no ano, tem-se para os dois casos a equação (6.16):

$$Alim = 6\text{€} * 250 = 1.500\text{€} \quad (7.16)$$

O valor total anual para ambos, ignorando os subsídios adicionais, pode ser encontrado na Tabela 7.3.

**Tabela 7.3 – Custos de Pessoal**

<b>Descritivo</b>	<b>Engenheiro</b>	<b>Técnico</b>
Ordenado Bruto	19.600€	16.240€
Segurança Social 23,75%	4.655€	3.857€
Seguro contra Acidentes 2%	392€	324,80€
Fundo de Compensação de Trabalho	196€	162,40€
Subsídio de Alimentação	1.500€	1.500€
Valor para a Empresa	26.343€	22.084,20€

Ao assumirmos que estes trabalham 5 dias por semana, durante oito horas, bem como a existência de 250 dias úteis em um ano, temos pela equação (7.17):

$$HorasAnuais = 250 \text{ d/a} * 8 \text{ h/d} = 2000 \text{ h/a} \quad (7.17)$$

Calculam-se os seguintes valores por hora, para um engenheiro e um técnico, pelas equações (7.18) e (7.19), respetivamente:

$$Eng = \frac{26.343 \text{ €/a}}{2000 \text{ h/a}} = 13,17 \text{ €/h} \quad (7.18)$$

$$Téc = \frac{22.084,20 \text{ €/a}}{2000 \text{ h/a}} = 11,04 \text{ €/h} \quad (7.19)$$

Considerando que estes utilizam uma média de cinquenta minutos, ou 0,83 horas, da sua rotina exclusivamente entre recolha e processamento de dados da bobinadora em questão, bem como a existência de 250 dias úteis num ano, tem-se, equação (7.20):

$$HorasAnuais = 250 \text{ d/a} * 0,83 \text{ h/d} = 207,50 \text{ h/a} \quad (7.20)$$

Calcula-se o valor anual para um engenheiro e um técnico respetivamente pelas equações (7.21) e (7.22).

$$TEng = 13,17 \text{ €/h} * 207,50 \text{ h/a} = 2.732,78 \text{ €/a} \quad (7.21)$$

$$TTéc = 11,04 \text{ €/h} * 207,50 \text{ h/a} = 2.290,80 \text{ €/a} \quad (7.22)$$

Desta forma, o custo anual total de pessoal relacionado com o levantamento de medidas de vibração e análise vibratória para a bobinadora de papel é dado pela equação (7.23):

$$CPTa = 2.732,78 \text{ €/a} + 2.290,80 \text{ €/a} = 5.023,58 \text{ €/a} \quad (7.23)$$

Obtém-se a Tabela 7.4 atualizada.

**Tabela 7.4 – Custos do Equipamento – pt. 3**

<b>Descritivo</b>	<b>Valor</b>
Custo Inicial	200.000€
Vida útil	8 anos
Valor residual	20.000€
Depreciação anual	25.000€/a
Horas Operacionais	8.160h/a
Produção por hora	500€/h
Produção Total	4.080.000€/a
Custos Operacionais	408.000€/a
Custos de Manutenção	40.000€/a
Paragens Inesperadas	50h
Custo de Paragens Inesperadas	25.000€
Custos de Pessoal	5.023,58€/a

#### 7.1.4 Comentários adicionais

Com base nos valores acima estimados é possível calcular o custo anual total do equipamento, tal como apresentado na Tabela 7.5.

**Tabela 7.5 – LCC**

<b>Descritivo</b>	<b>Valor</b>
AC: Depreciação anual	25.000€/a
OC: Custos Operacionais	408.000€/a
SC: Custos de Manutenção	40.000€/a
SC: Custos de Pessoal	5.023,58€/a
UC: Custo de Paragens Inesperadas	25.000€
LCC: Custos totais	503.023,58€/a

De forma a verificar-se a viabilidade de um investimento em prognóstico será feita a comparação entre dois cenários distintos, partindo-se dos valores encontrados na Tabela 7.5. O primeiro, um cenário positivo, considera um investimento de 50.000€ em tecnologias avançadas de manutenção preditiva, resultando em economias significativas e um retorno financeiro atrativo. Já o segundo, um cenário negativo, contempla um investimento maior, de 70.000€, porém com resultados menos expressivos devido a dificuldades de integração e adaptação do sistema, levando a uma recuperação do investimento mais lenta e inviável.

Embora haja evidências na literatura de que o uso de prognóstico pode estender a vida útil do equipamento e gerar ganhos adicionais através da depreciação, esse efeito não será considerado por falta de métodos claros para seu cálculo. Além disso, os custos operacionais, embora afetados, terão impacto mínimo e, por simplificação, serão desconsiderados nesta análise. Desta forma, o cálculo adaptado será dado através da Equação (7.24).

$$LCC = SC + UC \quad (7.24)$$

A comparação concentrar-se-á nos principais fatores económicos de cada cenário, procurando avaliar o impacto e o retorno do investimento, conforme a Tabela 7.6.

**Tabela 7.6 – Comparativo de Cenários**

Descritivo	Antes	Prognóstico (+)	Prognóstico (-)
MC: Investimento	-	50.000€	70.000€
SC: Custos de Manutenção	40.000€/a		
SC: Custos de Pessoal	5.023,58€/a		
UC: Custo de Paragens Inesperadas	25.000€/a		
LCC: Custos totais (sem MC)	70.023,58€/a		

## 7.2 Cenário 1: Positivo

Neste primeiro cenário, a transição para uma metodologia de prognóstico, que inclui a utilização de sensores inteligentes, a aplicação de *softwares* avançados e a execução de treinos especializados seria efetuada pelo investimento total de 50.000€.

A implementação desse sistema permitiria prever falhas futuras e adotar ações preventivas, resultando numa redução de 20% nos custos de manutenção, graças à antecipação na compra de equipamentos de substituição e melhores condições de negociação.

Além disso haveria uma redução de 70% nos custos de pessoal, com a introdução de *dashboards* que proporcionassem análises imediatas e automáticas do estado do equipamento, minimizando a necessidade de intervenção humana.

A redução nas paragens inesperadas seria de 30%, alcançada por meio da integração de dados de produção e manutenção numa plataforma coesa de Gestão de Ativos de Performance (APM), e pela aplicação de técnicas de *Machine Learning*. Isso possibilitaria uma estimativa mais precisa da RUL (*Remaining Useful Life*) e otimização dos parâmetros de configuração do equipamento, melhorando a eficiência operacional e a tomada de decisões, conforme os resultados mostrados na Tabela 7.7.

**Tabela 7.7 – Estimativa de Custos – Cenário Positivo**

<b>Descritivo</b>	<b>Antes</b>	<b>Com Prognóstico (+)</b>
MC: Investimento em Prognóstico	-	50.000€
SC: Custos de Manutenção	40.000€/a	32.000€/a
SC: Custos de Pessoal	5.023,58€/a	1.507,07€/a
UC: Custo de Paragens Inesperadas	25.000€/a	17.500€/a
LCC: Custos totais (sem MC)	70.023,58€/a	51.007,07€/a

### 7.2.1 Fluxo de caixa

Com uma economia anual de 19.516,51€, obtém-se o seguinte fluxo de caixa para os próximos cinco anos.

**Tabela 7.8 – Fluxo de Caixa – Cenário Positivo**

<b>Ano</b>	<b>Valor</b>
0	-50.000€
1	19.516,51€
2	19.516,51€
3	19.516,51€
4	19.516,51€
5	19.516,51€

Assumindo-se uma taxa TMA estimada em 10%, calculam-se os indicadores apresentados nas subsecções seguintes.

### 7.2.2 Valor atual líquido (VAL)

Por meio da equação (4.4) calcula-se o VAL como segue.

$$VAL = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} \quad (4.4)$$

$$VAL = -\frac{50.000}{(1+0,1)^0} + \frac{19.516,51}{(1+0,1)^1} + \frac{19.516,51}{(1+0,1)^2} + \frac{19.516,51}{(1+0,1)^3} + \frac{19.516,51}{(1+0,1)^4} + \frac{19.516,51}{(1+0,1)^5} \quad (7.25)$$

$$VAL = -50.000 + 17.742,28 + 16.129,35 + 14.663,05 + 13.329,13 + 12.114,15 = 23.982,93€ \quad (7.26)$$

O projeto gera um valor adicional de 23.982,93€ além do investimento inicial, indicando que ele é financeiramente viável e rentável, já que o VAL é positivo.

### 7.2.3 Taxa Interna de Rentabilidade (TIR)

A TIR pode ser calculada pela equação (4.5), como segue.

$$VAL = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (4.5)$$

$$0 = -\frac{50.000}{(1+TIR)^0} + \frac{19.516,51}{(1+TIR)^1} + \frac{19.516,51}{(1+TIR)^2} + \frac{19.516,51}{(1+TIR)^3} + \frac{19.516,51}{(1+TIR)^4} + \frac{19.516,51}{(1+TIR)^5} \quad (7.27)$$

Dado o complicado cálculo referente à equação (7.27), preferiu-se obter a TIR por meio da ferramenta Excel, obtendo-se um valor de 27,41%. Esta taxa é significativamente maior do que a TMA (10% estimada), o que indica que o projeto oferece uma alta taxa de retorno e deve ser aceite.

### 7.2.4 Período de Recuperação do Investimento (PRI)

Conforme visto anteriormente, pode-se obter o PRI ou *payback* por meio da equação (4.6).

$$PRI = t + \frac{\text{Investimento} - \sum_{i=1}^t CF_i}{CF_{t+1}} \quad (4.6)$$

De forma a encontrar-se a variável  $t$  deve-se acumular os fluxos de caixa até se obter o ponto de recuperação, ou seja, até que seja obtido novamente o valor investido, como segue.

$$Acumulado_0 = -50.000 \quad (7.28)$$

$$Acumulado_1 = -50.000 + 19.516,51 = -30.483,49 \quad (7.29)$$

$$Acumulado_2 = -30.483,49 + 19.516,51 = -10.966,98 \quad (7.30)$$

$$Acumulado_3 = -10.966,98 + 19.516,51 = 8.549,53 \quad (7.31)$$

Como observado, o investimento é recuperado entre os anos 2 e 3. Desta forma,  $t=2$ . Continuando o cálculo através da equação (4.6), tem-se:

$$PRI = 2 + \frac{50.000 - 39.033,02}{19.516,51} \approx 2,56a \quad (7.32)$$

O investimento inicial é recuperado em aproximadamente 2,56 anos, um prazo relativamente curto, o que reduz o risco associado ao projeto, já que os retornos começam a ser obtidos rapidamente.

### 7.3 Cenário 2: Negativo

Neste cenário consideramos uma transição para uma metodologia de prognóstico que, apesar de incluir a utilização de sensores inteligentes, aplicação de *softwares* avançados e execução de treinos especializados, apresenta desafios adicionais e menores impactos.

Devido a complexidades imprevistas e à necessidade de maior personalização dos sistemas, o investimento inicial aumentou para €70.000. Esse custo mais elevado inclui não apenas a compra de *hardware* e *software*, mas também custos adicionais com consultoria externa e adaptações no ambiente de produção que não estavam previstas inicialmente.

A redução nos custos de manutenção foi menor do que o esperado, ficando em apenas 10% ao invés dos 20% previstos. Isso deve-se à ineficiência na integração

dos novos sistemas com os processos de manutenção existentes, além de problemas na curva de aprendizagem da equipa.

Embora houvesse a expectativa de uma redução significativa nos custos de pessoal, a realidade foi diferente. A redução nos custos de pessoal ficou em 30%, ao invés dos 70% esperados. O motivo principal foi a necessidade de manter parte significativa da equipa para a monitorização manual e ajustes frequentes nos sistemas recém-implantados, que ainda não operam de forma totalmente automatizada.

As paragens inesperadas foram reduzidas, mas numa proporção menor do que o cenário positivo. A redução foi de apenas 10%, devido à dificuldade de implementação plena do sistema de *Machine Learning* e à necessidade contínua de ajustes nos algoritmos preditivos (Tabela 7.9).

**Tabela 7.9 – Estimativa de Custos – Cenário Negativo**

Descritivo	Antes	Com Prognóstico (-)
MC: Investimento em Prognóstico	-	70.000€
SC: Custos de Manutenção	40.000€/a	36.000€/a
SC: Custos de Pessoal	5.023,58€/a	3.516,51€/a
UC: Custo de Paragens Inesperadas	25.000€/a	22.500€/a
LCC: Custos totais (sem MC)	70.023,58€/a	62.016,51€/a

### 7.3.1 Fluxo de caixa

Para este cenário, a economia anual obtida fica cerca de 8.007,07€. Desta forma, o seguinte fluxo de caixa é observado para o projeto, nos próximos cinco anos.

**Tabela 7.10 – Fluxo de Caixa – Cenário Negativo**

Ano	Valor
0	-70.000€
1	8.007,07€
2	8.007,07€
3	8.007,07€
4	8.007,07€
5	8.007,07€

Tal como no cenário anterior, assume-se uma taxa TMA estimada em 10%.

### 7.3.2 Valor Atual Líquido (VAL)

Por meio da equação (4.4), calcula-se o VAL como segue.

$$VAL = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} \quad (4.4)$$

$$VAL = -\frac{70.000}{(1+0,1)^0} + \frac{8.007,07}{(1+0,1)^1} + \frac{8.007,07}{(1+0,1)^2} + \frac{8.007,07}{(1+0,1)^3} + \frac{8.007,07}{(1+0,1)^4} + \frac{8.007,07}{(1+0,1)^5} \quad (7.33)$$

$$VAL = -70.000 + 7.279,15 + 6.617,41 + 6.015,83 + 5.468,93 + 4.971,73 = -39.646,90 \quad (7.34)$$

O VAL negativo indica que o projeto não é viável, pois não recupera o investimento inicial com a taxa de retorno exigida.

### 7.3.3 Taxa Interna de Rentabilidade (TIR)

Novamente, calculou-se a TIR através da equação (4.5).

$$VAL = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (4.5)$$

$$0 = -\frac{70.000}{(1+TIR)^0} + \frac{8.007,07}{(1+TIR)^1} + \frac{8.007,07}{(1+TIR)^2} + \frac{8.007,07}{(1+TIR)^3} + \frac{8.007,07}{(1+TIR)^4} + \frac{8.007,07}{(1+TIR)^5} \quad (7.35)$$

Por meio da ferramenta Excel, obteve-se o valor de -16,14% para a TIR deste cenário, o que, pelo fato de ser inferior à TMA estimada inicialmente em 10%, prova que o projeto não é viável financeiramente.

### 7.3.4 Período de Recuperação do Investimento (PRI)

Conforme feito para o cenário anterior, utilizou-se a equação (4.6) para cálculo do PRI.

$$PRI = t + \frac{\text{Investimento} - \sum_{i=1}^t CF_i}{CF_{t+1}} \quad (4.6)$$

Seguem as iterações para encontro da variável  $t$ .

$$Acumulado_0 = -70.000 \quad (7.36)$$

$$Acumulado_1 = -70.000 + 8.007,07 = -61.992,93 \quad (7.37)$$

$$Acumulado_2 = -61.992,93 + 8.007,07 = -53.985,86 \quad (7.38)$$

$$Acumulado_3 = -53.985,86 + 8.007,07 = -45.978,79 \quad (7.39)$$

$$Acumulado_4 = -45.978,79 + 8.007,07 = -37.971,72 \quad (7.40)$$

$$Acumulado_5 = -37.971,72 + 8.007,07 = -29.964,65 \quad (7.41)$$

A partir da quinta iteração, que consiste no horizonte analisado para os fluxos de caixa, fica claro que o projeto não recupera o valor investido nos cinco anos. Entretanto, encontrou-se que o valor de 70.000€ acaba por ser pago entre a oitava e a nona interação, o que resulta na seguinte fórmula (7.42) atualizada.

$$PRI = 8 + \frac{70.000 - 64.056,56}{8.007,07} \approx 8,74a \quad (7.42)$$

Desta forma, o cenário negativo precisaria de um tempo adicional de 8,74 anos para recuperar o investimento inicial.

#### 7.4 Comparação de Cenários

Ao comparar os dois cenários apresentados, observa-se uma clara diferença na viabilidade financeira e operacional dos projetos. No cenário positivo, o investimento de 50.000€ numa metodologia de prognóstico avançada resultou em significativas economias operacionais. Com uma redução de 20% nos custos de manutenção, 70% nos custos de pessoal e 30% nas paradagens inesperadas, o projeto gerou um Valor Atual Líquido (VAL) positivo de 23.982,93€, uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 27,41% e um Índice de Rentabilidade (IR) de 1,48, indicando que cada Euro investido retorna 1,48€. Além disso, o Período de Recuperação do Investimento (PRI) foi de apenas 2,56 anos, o que reforça a atratividade e viabilidade do projeto.

Por outro lado, no cenário negativo, o mesmo tipo de transição para uma metodologia de prognóstico foi implementado, porém com um investimento inicial maior, de 70.000€, devido a desafios adicionais e a necessidade de personalização. Apesar do aumento no investimento, as economias alcançadas foram significativamente menores: 10% de redução nos custos de manutenção, 30% nos custos de pessoal e 10% nas paragens inesperadas. Esses resultados geraram um VAL negativo de -39.646,90€, uma TIR de -16,14%, e um IR de apenas 0,43, o que significa que o projeto não retorna sequer o valor investido, sendo financeiramente inviável. O PRI calculado, que se estenderia por 8,74 anos, demonstra um retorno lento e insatisfatório, agravando o risco do projeto.

A análise dos dois cenários evidencia que o cenário positivo oferece um retorno substancialmente superior com menor risco e maior eficiência operacional. Em contraste, o cenário negativo não falha apenas em recuperar o investimento num período aceitável, mas também apresenta um retorno insuficiente, inferior à taxa mínima de atratividade (TMA) estabelecida, justificando a sua rejeição.

Tais conclusões também podem ser observadas graficamente através da Figura 7.1, que apresenta o *payback* estimado para ambos os cenários nos próximos dez anos.

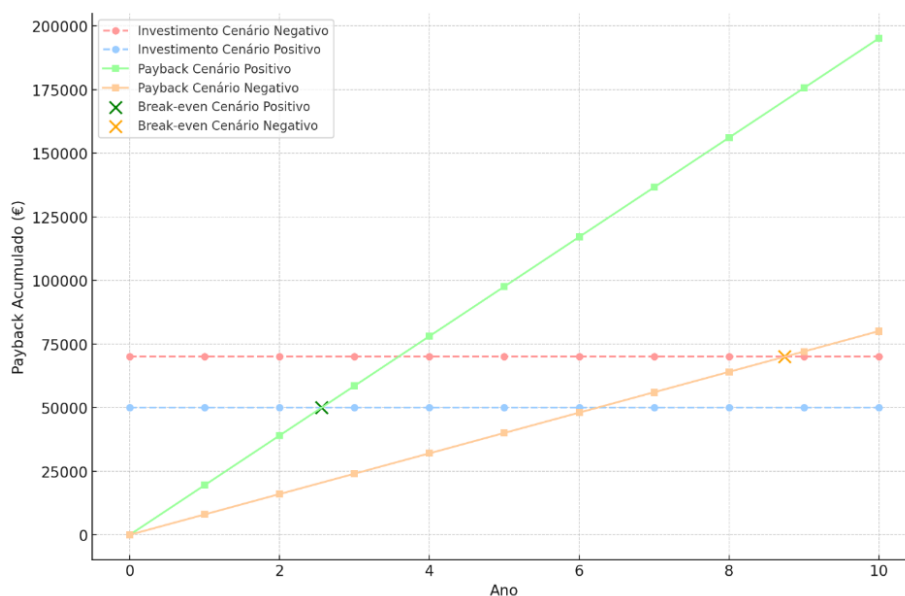


Figura 7.1 - Comparativo de Cenários

Ao comparar ambos os cenários com o estado anterior, sem investimento, fica claro que a implementação da metodologia de prognóstico pode oferecer benefícios substanciais, mas esses benefícios dependem fortemente da eficiência da implementação e da capacidade de superar os desafios iniciais. Enquanto o cenário positivo demonstra uma clara vantagem financeira e operacional, o cenário negativo revela que, sem uma execução eficaz e adaptabilidade, os ganhos podem ser

limitados, resultando num retorno insatisfatório sobre o investimento e um longo período para recuperar o capital investido.

É importante destacar que a análise financeira realizada não levou em consideração os ganhos marginais que poderiam ser obtidos pela redução dos custos operacionais e pelo aumento da vida útil dos equipamentos, afetando diretamente a depreciação. Embora os cálculos tenham sido focados nas economias diretas provenientes da implementação do prognóstico, o impacto positivo de uma manutenção mais eficaz e de menor desgaste dos ativos pode amplificar os benefícios financeiros ao longo do tempo por meio de diversas economias indiretas.

A Tabela 7.11 apresenta um comparativo entre os cenários analisados.

**Tabela 7.11 – Comparativo de Cenários**

<b>Descritivo</b>	<b>Antes</b>	<b>Prognóstico (+)</b>	<b>Prognóstico (-)</b>
MC: Investimento	-	50.000€	70.000€
LCC: Custos totais (sem MC)	70.023,58€/a	51.007,07€/a	62.016,51€/a
Economia Anual	-	19.516,51€/a	8.007,07€/a
VAL	-	23.982,93€	-39.646,90€
TIR	-	27,41%	-16,14%
PRI	-	2,56a	8,74a

## 8 DISCUSSÃO

O propósito inicial deste estudo seria a implementação de uma rotina de prognóstico numa bobinadora de papel, aproveitando-se o fato de a mesma já possuir um histórico de dados de vibração com alguns anos de existência e certa compacticidade em relação aos demais equipamentos da linha de produção, o que acabaria por permitir um estudo mais detalhado do mesmo. Desta forma, o cálculo da RUL seria viabilizado para componentes críticos deste sistema, permitindo a ocorrência de economias significativas a médio e longo prazo.

Neste intuito, foi feita uma abrangente revisão teórica sobre os desenvolvimentos recentes de Manutenção, com foco na CBM, bem como procedeu-se com o levantamento de informação referente às rotinas da bobinadora de forma a proceder-se da melhor forma com a implementação por meio de um planejamento detalhado das mudanças a serem efetuadas na obtenção de leituras e execução do Diagnóstico, necessárias para o funcionamento pleno do Prognóstico.

O projeto, entretanto, enfrentou desafios substanciais. O essencial para o desenvolvimento de um algoritmo computacional voltado ao Prognóstico, a base de dados, não existiu em quantidade e qualidade adequadas para o desenvolvimento, o que acabou por comprometer a viabilidade da implementação imediata da metodologia. Além de uma quantidade limitada de dados, a forma de obtenção e leitura dos mesmos, passível de diversos ajustes e análises manuais, mostrou-se inadequada para aplicação em sistemas de *Machine Learning*, os quais requerem pouca ou nenhuma intervenção para funcionar adequadamente. Para além destes há o fato de que uma bobinadora de papel ser um equipamento relativamente específico, o que ocasiona a existência de uma literatura limitada na implementação de uma metodologia de vanguarda, como o Prognóstico.

Dada a inviabilidade de implementação detetada nesta etapa, o foco passou a ser a elaboração de sugestões para um futuro projeto voltado ao Prognóstico e a uma análise de viabilidade financeira para tal implementação. Primeiro, determinou-se uma forma de medir o impacto de um projeto de manutenção desta magnitude através da observação dos efeitos do mesmo nos LCC, utilizando-os como parâmetros de *performance* financeira do projeto. De seguida, foram desenvolvidos cenários positivos e negativos de implementação do prognóstico em diferentes circunstâncias, considerando o impacto nos custos diretos de manutenção.

Fazem-se comentários adicionais nas seções seguintes.

### 8.1 Análise dos Objetivos

A seguir, discute-se o cumprimento de cada um dos objetivos específicos definidos no começo do estudo.

1. Realizar uma revisão abrangente da literatura sobre estratégias de manutenção industrial, com ênfase nas metodologias de manutenção baseada na condição – Este objetivo foi amplamente cumprido. O estudo realizou uma revisão detalhada das principais estratégias de manutenção industrial, com foco na CBM. A revisão explorou a evolução das práticas de manutenção ao longo das várias revoluções industriais no seu respetivo período, culminando no desenvolvimento das metodologias modernas, na qual se inclui a CBM e as suas nuances. Também se promoveu uma breve revisão sobre a indústria papelreira e fabricação de papel.
2. Avaliar a viabilidade técnica da implementação de um sistema de Prognóstico em uma bobinadora de papel e, caso seja viável, proceder com o desenvolvimento do mesmo – Este objetivo foi parcialmente alcançado por meio do desenvolvimento do capítulo Estudo de Caso. Durante o mesmo foi efetuada uma revisão nas rotinas de manutenção da bobinadora, de forma a perceber-se a melhor forma de prosseguir com a implementação do Diagnóstico. No decorrer dos trabalhos, notou-se que a base de dados possuía limitações significativas que impediam a implementação do Prognóstico, sinalizando deficiências a nível de processo e infraestrutura que inviabilizaram o desenvolvimento do algoritmo conforme presumido inicialmente.
3. Avaliar a viabilidade financeira de um projeto de implementação do Prognóstico, caso a implementação do mesmo não seja possível – Este objetivo foi cumprido. O estudo propôs melhorias para a infraestrutura de monitorização de vibração, incluindo o aumento da frequência de recolha de dados e a integração de sensores *online* e *offline*. A análise financeira comparativa, utilizando uma metodologia adaptada de análise dos LCC presentes no equipamento, foi essencial para avaliar diferentes cenários de implementação, demonstrando que, em alguns casos, a adoção do prognóstico pode ser financeiramente vantajosa, mesmo diante de desafios técnicos e custos iniciais elevados.

## 8.2 Contribuições para a ciência

Este estudo oferece contribuições importantes para a aplicação de técnicas de prognóstico no contexto da indústria papelreira. A utilização de monitorização de vibração para prever a RUL é uma abordagem recente, que carece de uma literatura desenvolvida em ambientes industriais específicos, como o das bobinadoras de papel.

Nesse sentido, a revisão de literatura pode servir de base para a compreensão de conceitos relativamente complexos de CBM, como a relação existente entre Diagnóstico e Prognóstico e os diferentes tipos de metodologias aplicados na sua gestão. Da mesma forma, a revisão promovida sobre o processo de fabricação de papel, os indicadores levantados sobre este mercado e a informação sobre o

funcionamento de uma bobinadora podem servir de base para trabalhos futuros efetuados neste tipo de equipamento.

A catalogação de uma rotina de manutenção para Diagnóstico de falhas também promove uma contribuição significativa na medida em que expõe na prática as adaptações e customizações feitas para aplicação da mesma neste ambiente de equipamento específicos.

A utilização dos LCC como parâmetros de avaliação da *performance* financeira de um projeto também pode servir de base em situações onde o impacto dos investimentos de manutenção pode ser de difícil compreensão. Ainda que se verifique a existência de uma extensa literatura teórica e prática no estudo de viabilidade de projetos, sendo também uma área com constantes desenvolvimentos, o levantamento de custos de manutenção constitui uma dificuldade substancial verificada na prática durante o estudo.

Por fim, a literatura sobre a viabilidade financeira da CBM é extremamente rara. Sabe-se que há ganhos financeiros por meio das melhorias obtidas no processo de manutenção, mas quantificar esses ganhos consiste numa dificuldade desafiadora de forma que, ainda que os custos utilizados no estudo de viabilidade sejam estimados, as etapas obtidas no sentido de classificá-los como impactantes nos LCC e o uso das técnicas de avaliação de *performance* descritos no capítulo podem servir como um caminho no desenvolvimento de trabalhos com este fim.

### **8.3 Limitações do Estudo**

O estudo enfrentou diversas limitações que impactaram o desenvolvimento do prognóstico. Uma das principais limitações foi a disponibilidade restrita de dados de monitorização. Embora os dados de vibração tenham sido suficientes para o desenvolvimento da rotina de Diagnóstico utilizada no equipamento, a falta de um historial robusto reduziu a capacidade de refinar os modelos preditivos, limitando a precisão dos cálculos de RUL e tornando a implantação do Prognóstico inviável.

Outra limitação significativa consistiu na ausência de literatura para o equipamento e sobre os ganhos financeiros promovidos pela implementação do Prognóstico, o que causou a adaptação de técnicas existentes para a obtenção desta informação.

Os dados financeiros utilizados na etapa do estudo de viabilidade não se encontravam à disposição para uso no projeto, seja pela necessidade de protegê-los como uma forma de defesa no concorrido mercado papeleiro ou pelo fato dos mesmos não estarem devidamente calculados. Além disso, a análise financeira, embora detalhada, revelou que o custo inicial da implementação do sistema de prognóstico pode ser proibitivo para algumas empresas. Os investimentos em sensores, sistemas de monitorização e treino da equipa técnica são significativos, e a falta de uma estrutura adequada de dados pode dificultar a obtenção de benefícios rápidos.

## 9 CONCLUSÃO E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 9.1 Conclusão

O campo da manutenção evoluiu significativamente desde a segunda metade do século XX, especialmente no início do século XXI. Inicialmente considerada uma área secundária, a manutenção industrial passou a ser vista como um componente estratégico para a gestão empresarial, essencial para a lucratividade e eficiência operacional. Esse avanço foi impulsionado pelo desenvolvimento de tecnologias inovadoras e pela integração de sistemas complexos.

Neste contexto, a manutenção condicionada utiliza técnicas avançadas para diagnosticar problemas e determinar a vida útil remanescente dos equipamentos, consolidando-se como um dos pilares da manutenção moderna. Sensores monitoram diversos aspetos, como vibração, sons e aparência visual, permitindo diagnósticos antecipados para planeamento e resolução de falhas.

Avanços recentes incluem sensores inteligentes conectados via IoT, que coletam dados em tempo real sobre as condições operacionais dos equipamentos. Algoritmos de Machine Learning processam esses dados, identificando padrões e prevendo falhas iminentes, além de permitir a visualização da RUL de um equipamento. Essa integração tecnológica não só aprimora a precisão dos diagnósticos, mas também otimiza a programação das intervenções de manutenção, reduzindo o tempo de inatividade e os custos operacionais.

O estudo de caso evidenciou algumas das dificuldades abordadas na literatura, especialmente relacionadas à gestão de dados. Apesar das vantagens potenciais, a insuficiência de dados e a baixa frequência de coleta foram obstáculos significativos para a implementação eficaz de um sistema de prognóstico. No futuro, serão necessários investimentos e mudanças nas formas de trabalho para a adoção dessa metodologia.

Vale salientar que, apesar de a empresa não seguir rigorosamente os preceitos da manutenção condicionada, especialmente devido à falta de metodologias avançadas de gestão de informações, ela apresenta um método de trabalho eficiente e relativamente simples para a deteção de falhas. Isso demonstra como a Manutenção Condicionada pode ser adaptada a diferentes contextos e fins.

A análise financeira sugeriu que o retorno sobre o investimento em Prognóstico depende diretamente da capacidade da empresa em superar os desafios iniciais e adaptar as suas operações para maximizar os benefícios proporcionados. Embora o cenário positivo tenha demonstrado uma redução significativa nos custos de manutenção e uma melhoria na previsibilidade das falhas, o cenário negativo destacou os riscos financeiros associados à implementação ineficaz dessa tecnologia, revelando a necessidade de uma abordagem cuidadosamente planeada e executada.

Enquanto a manutenção evoluiu para se tornar uma peça fundamental na estratégia corporativa, a plena realização de seu potencial depende da superação de desafios técnicos e financeiros. Investimentos em tecnologias de monitorização e análise de dados, juntamente com uma abordagem estratégica, podem transformar a manutenção numa fonte de vantagem competitiva sustentável a longo prazo.

## 9.2 Trabalhos Futuros

Dentre as sugestões de melhoria propostas no estudo de caso, duas seriam as mais significativas não só para obtenção da RUL em breve, mas também ocasionariam melhorias significativas no diagnóstico de falhas.

- Integração de Dados de Produção no Sistema APM – Deve-se explorar como a integração dos dados de produção, como torques dos motores, velocidade, pressão, e dimensões das bobinas, pode melhorar a análise dos dados de manutenção. O foco seria a criação de *dashboards* que apresentem informações em tempo real e na construção de uma base de dados robusta para alimentar algoritmos de *Machine Learning*.
- Revisão e Atualização da Infraestrutura de Dados – Analisar a infraestrutura atual da empresa, incluindo servidores e redes de dados, e propor melhorias necessárias para suportar a coleta e o processamento de grandes volumes de dados resultantes de uma maior frequência de coleta. Também devem ser avaliadas soluções de armazenamento em nuvem e a implementação de redes de alta velocidade e baixa latência.

Por meio destas alterações, será possível, também, o desenvolvimento do objetivo original proposto para este trabalho:

- Utilização de Técnicas de *Machine Learning* para Prognóstico e Diagnóstico - Focar no desenvolvimento e aplicação de modelos de *Machine Learning*, como ANNs e CNNs, para prever falhas e calcular a RUL. A pesquisa deve incluir o desenvolvimento e teste das aplicações, bem como a avaliação da precisão e da eficácia das previsões geradas.

No âmbito financeiro, propõe-se o seguinte estudo:

- Impacto do Prognóstico nas Demonstrações Financeiras – A literatura sugere que o prognóstico e a manutenção condicionada podem influenciar a vida útil do equipamento, resultando em novas abordagens para o cálculo financeiro e, conseqüentemente, afetando os resultados da empresa. Este estudo concentrar-se-á em determinar essas novas metodologias de cálculo e as suas implicações financeiras, procurando quantificar o impacto positivo que a implementação dessas práticas pode ter nas demonstrações financeiras da organização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Poór, J. Basl, e D. Zenisek, «Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development», em *2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*, 2019, pp. 245–253. doi: 10.23919/SCSE.2019.8842659.
- [2] A. Pintelon Liliane and Parodi-Herz, «Maintenance: An Evolutionary Perspective», em *Complex System Maintenance Handbook*, London: Springer London, 2008, pp. 21–48. doi: 10.1007/978-1-84800-011-7\_2.
- [3] D. N. P. Kobbacy K. A. H. and Murthy, «An Overview», em *Complex System Maintenance Handbook*, London: Springer London, 2008, pp. 3–18. doi: 10.1007/978-1-84800-011-7\_1.
- [4] A. K. S. Jardine e A. H. C. Tsang, *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications, Second Edition*, 2nd ed. CRC Press, 2013. doi: 10.1201/b14937.
- [5] J. Veldman, H. Wortmann, e W. Klingenberg, «Methodology and theory typology of condition based maintenance», *J Qual Maint Eng*, vol. 17, n. 2, pp. 183–202, 2011, doi: 10.1108/13552511111134600.
- [6] A. Prajapati, J. Bechtel, e S. Ganesan, «Condition based maintenance: A survey», *J Qual Maint Eng*, vol. 18, n. 4, pp. 384–400, 2012, doi: 10.1108/13552511211281552.
- [7] «Norma Portuguesa NP EN 13306:2007: Terminologia da Manutenção», 2007
- [8] R. Ahmad e S. Kamaruddin, «An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application», *Comput Ind Eng*, vol. 63, n. 1, pp. 135–149, 2012, doi: 10.1016/j.cie.2012.02.002.
- [9] Z. Simeu-Abazi e C. Sassine, «Maintenance Integration in Manufacturing Systems: From the Modeling Tool to Evaluation», em *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 13, 2001, pp. 267–285. doi: 10.1023/A:1011147602744.
- [10] P. Poor, D. Ženíšek, e J. Basl, «Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions», em *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, IEOM Society International, Set. 2019, pp. 495–504. Acedido: 3 de Fevereiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/335444202\\_Historical\\_Overview\\_of\\_Maintenance\\_Management\\_Strategies\\_Development\\_from\\_Breakdown\\_Maint](https://www.researchgate.net/publication/335444202_Historical_Overview_of_Maintenance_Management_Strategies_Development_from_Breakdown_Maint)

- enance\_to\_Predictive\_Maintenance\_in\_Accordance\_with\_Four\_Industrial\_Revolutions
- [11] U. Kumar, «System Maintenance: Trends in Management and Technology», em *Handbook of Performability Engineering*, K. B. Misra, Ed., London: Springer London, 2008, pp. 773–787. doi: 10.1007/978-1-84800-131-2\_47.
- [12] R. F. Stapelberg, «Availability and Maintainability in Engineering Design», em *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*, London: Springer London, 2009, pp. 295–527. doi: 10.1007/978-1-84800-175-6\_4.
- [13] L. Bassi, «Industry 4.0: Hope, hype or revolution?», em *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/RTSI.2017.8065927.
- [14] B. Al-Najjar, «On establishing cost-effective condition-based maintenance: Exemplified for vibration-based maintenance in case companies», *J Qual Maint Eng*, vol. 18, n. 4, pp. 401–416, 2012, doi: 10.1108/13552511211281561.
- [15] N. Bacha, «Decision support model for condition-based maintenance of manufacturing equipment», University of Minho, Guimarães, 2019. Acedido: 10 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/66108>
- [16] K. L. Tsui, N. Chen, Q. Zhou, Y. Hai, e W. Wang, «Prognostics and health management: A review on data driven approaches», *Math Probl Eng*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/793161.
- [17] A. Davies, *Management Guide to Condition Monitoring in Manufacture*. em *Management of Technology*. Institution of Engineering and Technology, 1990. doi: 10.1049/PBME001E.
- [18] R. K. Mobley, «Condition based maintenance», em *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*, A. Davies, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 1998, pp. 35–53. doi: 10.1007/978-94-011-4924-2\_2.
- [19] Y. Wang, X. Li, J. Chen, e Y. Liu, «A condition-based maintenance policy for multi-component systems subject to stochastic and economic dependencies», *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 219, p. 108174, 2022, doi: 10.1016/j.ress.2021.108174.
- [20] A. K. S. Jardine, D. Lin, e D. Banjevic, «A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance», Outubro de 2006. doi: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [21] R. K. Mobley, «15 - Establishing a Predictive Maintenance Program», em *An Introduction to Predictive Maintenance (Second Edition)*, Second Edition., R. K.

- Mobley, Ed., em *Plant Engineering*. , Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002, pp. 325–351. doi: 10.1016/B978-075067531-4/50015-4.
- [22] A. Davies, Ed., *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*. Springer Dordrecht, 1998. doi: 10.1007/978-94-011-4924-2.
- [23] R. K. Mobley, «6 - Predictive Maintenance Techniques», em *An Introduction to Predictive Maintenance (Second Edition)*, Second Edition., R. K. Mobley, Ed., em *Plant Engineering*. , Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002, pp. 99–113. doi: 10.1016/B978-075067531-4/50006-3.
- [24] K. Löwenmark, C. Taal, S. Schnabel, e M. Liwicki, «Technical Language Supervision for Intelligent Fault Diagnosis», *Int J Progn Health Manag*, vol. 13, 2023, doi: 10.36001/ijphm.2022.v13i2.3137.
- [25] W. Wang, «Condition-based Maintenance Modelling», em *Complex System Maintenance Handbook*, London: Springer London, 2008, pp. 111–131. doi: 10.1007/978-1-84800-011-7\_5.
- [26] R. K. Mobley, «12 - Visual Inspection», em *An Introduction to Predictive Maintenance (Second Edition)*, Second Edition., R. K. Mobley, Ed., em *Plant Engineering*. , Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002, pp. 259–266. doi: 10.1016/B978-075067531-4/50012-9.
- [27] D. Goyal e B. S. Pabla, «Condition based maintenance of machine tools-A review», 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.cirpj.2015.05.004.
- [28] J. Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, e L. Ma, «Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry», *Mech Syst Signal Process*, vol. 25, n. 5, pp. 1803–1836, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.ymssp.2010.11.018.
- [29] D. A. Tobon-Mejia, K. Medjaher, e N. Zerhouni, «The ISO 13381-1 standard's failure prognostics process through an example», em *2010 Prognostics and System Health Management Conference, PHM '10*, 2010. doi: 10.1109/PHM.2010.5413482.
- [30] R. Tinga Tiedo and Loendersloot, «Physical Model-Based Prognostics and Health Monitoring to Enable Predictive Maintenance», em *Predictive Maintenance in Dynamic Systems: Advanced Methods, Decision Support Tools and Real-World Applications*, M. Lughofer Edwin and Sayed-Mouchaweh, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 313–353. doi: 10.1007/978-3-030-05645-2\_11.
- [31] H. Lee Jay and Wang, «New Technologies for Maintenance», em *Complex System Maintenance Handbook*, London: Springer London, 2008, pp. 49–78. doi: 10.1007/978-1-84800-011-7\_3.
- [32] M. Lughofer Edwin and Sayed-Mouchaweh, «Prologue: Predictive Maintenance in Dynamic Systems», em *Predictive Maintenance in Dynamic Systems: Advanced Methods, Decision Support Tools and Real-World*

- Applications*, M. Lughofer Edwin and Sayed-Mouchaweh, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 1–23. doi: 10.1007/978-3-030-05645-2\_1.
- [33] R. K. Mobley, «1 - Impact of Maintenance», em *Maintenance Fundamentals (Second Edition)*, Second Edition., R. K. Mobley, Ed., em Plant Engineering. , Burlington: Butterworth-Heinemann, 2004, pp. 1–10. doi: 10.1016/B978-075067798-1/50022-4.
- [34] R. K. Mobley, «2 - Financial Implications and Cost Justification», em *An Introduction to Predictive Maintenance (Second Edition)*, Second Edition., R. K. Mobley, Ed., em Plant Engineering. , Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002, pp. 23–42. doi: 10.1016/B978-075067531-4/50002-6.
- [35] B. Al-Najjar e I. Alsyof, «Vibration-Based Maintenance Costs, Potential Savings and Benefits: A Case Study», em *Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, A. G. Starr e R. B. K. N. Rao, Eds., Vaxjo, Sweden: Elsevier Science Ltd., 2001, pp. 217–224.
- [36] A. R. P. Gomes, «Depreciação de Ativos Fixos Tangíveis: Perspetivas Contabilística e Fiscal», Mestrado, Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2020. Acedido: 3 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10316/94703>
- [37] «Decreto Regulamentar n.º 25/2009, de 14 de Setembro». Acedido: 27 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/analise-juridica/decreto-regulamentar/25-2009-489774>
- [38] V. J. S. Salgado, «Análise dos Custos de Transformação numa Empresa Têxtil», Mestrado, Universidade do Minho, 2013. Acedido: 20 de Fevereiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/28456>
- [39] República Portuguesa, *Código do Trabalho*. Diário da República, 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://portal.act.gov.pt/AnexosPDF/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20nacional/C%C3%B3digo%20do%20trabalho.pdf>
- [40] «Portaria n.º 107-A/2023, de 18 de abril». Acedido: 26 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/107-a-2023-211996386>
- [41] «Principais respostas ao aumento do custo de vida: do cabaz aos combustíveis». Acedido: 26 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc23/comunicacao/noticia?i=principais-respostas-ao-aumento-do-custo-de-vida-do-cabaz-aos-combustiveis>

- [42] Segurança Social, «Cálculo das Contribuições». Acedido: 26 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.seg-social.pt/calculo-das-contribuicoes1>
- [43] Direção-Geral da Administração e do Emprego Público (DGAEP), «Acidentes de Trabalho e Doenças Profissionais no Setor Público». Acedido: 26 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.dgaep.gov.pt/index.cfm?OBJID=833552A6-654B-47B7-B3AE-F0656BACF927>
- [44] Direção-Geral do Emprego e das Relações de Trabalho (DGERT), «Fundo de Compensação do Trabalho / Fundo de Garantia de Compensação do Trabalho». Acedido: 26 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.dgert.gov.pt/legislacao-nacional-fundo-de-compensacao-do-trabalho-fundo-de-garantia-de-compensacao-do-trabalho>
- [45] P. P. V. Rocha, «Estudo de Viabilidade Económica de um Projeto de Investimento Realizado numa Indústria de Calibragem de Tripa de Porco», Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, Portugal, 2019. Acedido: 10 de Janeiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/64161>
- [46] A. L. P. Xirimimbi, «Avaliação de Projetos de Investimento em Contexto de Risco e Incerteza», Mestrado, Instituto Superior Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Ciências Empresariais, Setúbal, Portugal, 2018. Acedido: 10 de Janeiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.26/20862>
- [47] H. Holik, T. Moldenhauer, G.-H. Rentrop, P. F. Tschudin, e W. K. von Kendenich, *Handbook of Paper and Board*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. doi: 10.1002/9783527652495.ch1.
- [48] María Cristina Area e Song Won Park, *Panorama de la Industria de Celulosa y Papel y Materiales Lignocelulósicos 2016. 2017*. Acedido: 3 de Março de 2024. [Em linha]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317094519\\_Panorama\\_de\\_la\\_Industria\\_de\\_Celulosa\\_y\\_Papel\\_y\\_Materiales\\_Lignocelulosicos\\_2016](https://www.researchgate.net/publication/317094519_Panorama_de_la_Industria_de_Celulosa_y_Papel_y_Materiales_Lignocelulosicos_2016)
- [49] J. F. R. A. da Silva, «Avaliação financeira da The Navigator Company, S.A.», Mestrado, ISCTE Business School, Lisboa, Portugal, 2017. Acedido: 3 de Março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10071/15518>
- [50] BIOND - Associação das Bioindústrias de Base Florestal, «Boletim estatístico da BIOND 2022», 2023, Lisboa. Acedido: 3 de Maio de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.biond.pt/publicacoes/boletim-estatistico-2022/>
- [51] T. Mushiri, G. Mashana, e C. Mbohwa, «Design of a paper slitting and rewinding machine for a developing country, Zimbabwe», IEOM Society

International, 2016. Acedido: 8 de Julho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://ieomsociety.org/ieomdetroit/pdfs/344.pdf>

- [52] Informador Fiscal, «Tabela I - Taxas Específicas: Regime das Depreciações e Amortizações para efeitos do IRC», 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://informador.pt/legislacao/lexit/codigos/direito-fiscal/codigo-do-irc/legislacao-complementar-2/regime-das-depreciacoes-e-amortizacoes-para-efeitos-do-irc/tabela-i-taxas-especificas/>
- [53] C. J. L. Domingos, «Relatório de Estágio - Randstad», Mestrado, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo, Faro, Portugal, 2017. Acedido: 23 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.1/10007>

## **10 ANEXOS**

Anexo 1: Lista de Vigilância

Anexo 2: Codificação dos Sensores

Anexo 3: Folha Estatística

## 10.1 Anexo 1: Lista de Vigilância

EQUIPAMENTOS EM VIGILÂNCIA										
	Código	Descrição do Equipamento	Causa Provável/Anomalia	Estado	Observações	gE	mm/s	Ten d.	NA nº	Data
<b>Transformação</b>										
24	97.286002-R	RED.DESINTEG.QUEBRAS TRANSFÇ.P.3	Assinatura Vibracional Elevada	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução.	9,8	6,4	→	1070107	30/nov/22
25	97.507007	EXAUST.POEIRAS CORTES"TRIMVAC" 3	Rolamentos em degradação	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução.	8,5	8,0	→	1046383	9/dez/22
26	92.211137	BB 2 (DIAM.241) DESINTEG BOBINADORA 2	Assinatura Vibracional Elevada.	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução	3,5	1,4	↗	1102614	9/nov/23
27	97.50647	BB Vacuo da Sobreposição Folhas Fólio 1	Rolamentos em degradação	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução	25,1	22,0	↑	1118706	1/fev/24
<b>On-Line PM1</b>										
28	91.50643-09	ROLO GUIIA P9 DO FELTRO PICK-UP	Batimento/ Rolamento LOA em degradação	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução	1,4	17,8	↗	1070112	4/mai/23
29	91.50654-13	ROLO CANTO SUP S066 6ºGR PRE-SEC	Rolamento LOA em Degradação	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução	0,3	0,9	↗	1070110	24/ago/23
<b>On-Line PM2</b>										
30	92.507684	TURBO BLOWER	Rolamentos LOA em Degradação	<b>Vigilância 2</b>	Acompanhar evolução.	27,7	0,8	→	1085740	10/ago/23
31	92.507210-01	Cil. Formador F1.01 DS	Rolamentos LA em Degradação	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução.	0,2	0,3	→	1090354	7/set/23
32	92.507360-15	Rolo Tensor S4.09 DS	Rolamentos LA em Degradação	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução.	1,5	3,0	↗	1118675	1/fev/24
33	92.507560-11	Rolo Guia S12.05 TS	Batimento/ Folgas	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução.	2,2	3,6	→	1122769	22/fev/24
34	92.507560-15	Rolo S12.09 TS	Rolamentos LOA em Degradação	<b>Vigilância 1</b>	Acompanhar evolução.	1,2	1,5	↗	1122771	22/fev/24

Equipamentos em Vigilância 1	27	<b>0,785%</b>
Equipamentos em Vigilância 2	4	<b>0,116%</b>
Equipamentos em Crítico	0	<b>0,000%</b>

Tendência está a : Subir Elev. ↑  
 Subir Lig. ↗  
 Manter →  
 Baixar ↓

**Nota: a classificação do estado do equipamento obedece ao seguinte critério:**

<b>OK</b>	Equipamento em BOAS condições
<b>Vigilância 1</b>	Equipamentos em condições ACEITÁVEIS, evidenciando anomalia ou avaria em desenvolvimento
<b>Vigilância 2</b>	Equipamentos em ALERTA com anomalia, a necessitar de intervenção
<b>Crítico</b>	Equipamento com AVARIA em desenvolvimento a necessitar intervenção de curto prazo

## 10.2 Anexo 2: Codificação dos Sensores de Vibração



VA – VERTICAL ACELERAÇÃO (g)  
VE4 – VERTICAL ACELERAÇÃO FILTRADA E4 (gE)  
VE3 – VERTICAL ACELERAÇÃO FILTRADA E3 (gE)  
VE2 – VERTICAL ACELERAÇÃO FILTRADA E2 (gE)  
VV – VERTICAL VELOCIDADE (mm/s)  
AV – AXIAL VELOCIDADE (mm/s)  
IP – ENTRADA  
OP – SAÍDA  
HR – ALTA RESOLUÇÃO  
HF – ALTA FREQUÊNCIA  
DE – LADO ACIONAMENTO  
NDE – LADO OPOSTO ACIONAMENTO



### 10.3 Anexo 3: Folha Estatística

Tipo de Leitura	EQUIP	Deteção	Unidade	Sinal	mean	std	min	25%	median	75%	max	count		
1 - Online	Paper Roll	Peak-to-Peak (Real)	gE	01HE2 DS	0,4	0,31	0	0,06	0,44	0,69	1,23	2503		
				01HE3 DS	2,95	3,34	0	0,08	0,69	6,7	13,1	2591		
				02HE2 TS	1,54	2,48	0	0,04	0,47	2,21	21,57	959		
		RMS	mm/s	02HE3 TS	2,41	2,2	0	0,07	2,27	3,75	16,62	1267		
				01HV DS	0,79	0,95	0,06	0,16	0,34	1,02	5,74	2057		
				02HV TS	2,97	5,83	0,06	0,23	1,07	2,41	37,7	620		
	Winder Drum 2	Peak-to-Peak (Real)	gE	01HE2 DS	0,67	1,42	0	0,04	0,07	0,46	12,09	2024		
				01HE3 DS	1,89	2,42	0	0,06	0,29	3,31	12,04	2103		
				02HE2 TS	0,8	1,43	0	0,11	0,24	0,81	17,74	2295		
		RMS	mm/s	02HE3 TS	1,84	2,37	0	0,2	0,51	2,82	26,54	1497		
				01HV DS	0,6	0,79	0,06	0,14	0,3	0,56	4,44	1955		
				02HV TS	1,03	1,09	0,08	0,37	0,71	1,08	10,7	2073		
	Winder Drum 1	Peak-to-Peak (Real)	gE	01HE2 DS	0,92	1,69	0	0,05	0,2	0,82	17,91	2202		
				01HE3 DS	3,25	4,14	0	0,06	0,86	6,81	13,92	2292		
				02HE2 TS	0,63	1,03	0	0,04	0,1	0,67	8,16	2024		
		RMS	mm/s	02HE3 TS	2,84	3,12	0	0,05	1,9	4,64	21,42	1906		
				01HV DS	1,25	5,41	0,05	0,15	0,3	0,91	162,37	2087		
				02HV TS	0,77	0,95	0,05	0,16	0,25	1,14	6,68	2174		
2 - Manual	Motor	Peak	g	01HA NDE HF	2,35	0,63	1,31	2,12	2,5	2,64	3,36	10		
				02HA DE HF	1,6	0,38	1,14	1,26	1,62	1,78	2,38	10		
				Peak-to-Peak	gE	01HE3 NDE	7,09	1,6	3,05	5,98	6,97	8,07	10,93	49
		02HE3 DE	4,63	1,15		2,52	3,74	4,57	5,53	7,08	47			
		RMS	mm/s	01HV NDE	0,52	0,15	0,27	0,42	0,49	0,59	1,06	48		
				02AV DE	0,31	0,11	0,16	0,22	0,3	0,35	0,71	42		
				02HV DE HF	0,64	0,2	0,37	0,49	0,57	0,72	1,17	45		
		Motor	Rotation-Speed	RPM	SPEED	682,86	7,38	657,98	684,99	684,99	684,99	684,99	684,99	38
					Peak	g	01HA NDE HF	2,3	0,64	1,15	1,95	2,25	2,71	3,38
	02HA DE HF				1,38		0,3	0,62	1,39	1,46	1,56	1,67	10	
	Peak-to-Peak		gE	01HE3 NDE	6,45	1,32	3,33	5,62	6,29	7,42	9,09	44		
				02HE3 DE	4,59	1,01	1,62	3,91	4,5	5,24	6,69	43		
				RMS	mm/s	01HV NDE	0,57	0,23	0,16	0,44	0,56	0,67	1,51	42
	02AV DE	0,27	0,1	0,12		0,2	0,24	0,32	0,63	42				
	02HV DE HF	0,67	0,24	0,35		0,48	0,65	0,73	1,64	43				
	Winder Drum 2	Rotation-Speed	RPM	SPEED	729,97	0	729,97	729,97	729,97	729,97	729,97	729,97	35	
				IMx21_D1	202,22	285,97	0	0	0	553,55	795,78	1727		