



IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NUMA INDÚSTRIA DE SEMICONDUCTORES

TIAGO NARCISO DA COSTA FERNANDES

julho de 2022



IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NUMA INDÚSTRIA DE SEMICONDUCTORES

TIAGO NARCISO DA COSTA FERNANDES

Maio de 2022

IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NUMA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

Tiago Narciso da Costa Fernandes

1160973

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NUMA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

Tiago Narciso da Costa Fernandes

1160973

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação da Doutora Rafaela Carla Barros Casais

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutora Rafaela Carla Barros Casais

Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutora Ana Luísa Ferreira Andrade Ramos

Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a toda a equipa de Engenharia de Equipamento da ATEP, principalmente aos Engenheiros Hugo Barros e Domingos Pinto pela cooperação e pelo incentivo dado, e especialmente ao Técnico de Manutenção Bruno Teixeira por todos os ensinamentos, por toda a ajuda na realização do projeto, pela motivação dada e pela passagem de valores.

À Engenheira Rafaela Casais, por toda a ajuda, incentivo e entrega demonstrados no decorrer do desenvolvimento da presente dissertação.

Aos meus pais e à minha irmã, por todo o apoio neste percurso, que apenas se tornou possível graças a eles.

Quero agradecer à minha namorada, que me incentivou desde o início e que me deu diferentes perspetivas de resolução para os diversos problemas que foram surgindo.

Aos meus amigos, que me motivaram e partilharam conhecimentos comigo nesta etapa tão importante.

Agradeço a todos que contribuíram de forma indireta neste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

Manutenção, Manutenção Preditiva, Manutenção Baseada na Condição, Manutenção Centrada na Fiabilidade, Sensorização, Indústria 4.0

RESUMO

O aumento da competitividade industrial e a procura pela gestão de excelência proporcionaram a busca incessante por novas estratégias de gestão, estratégias essas que proporcionassem o aumento da eficácia e da eficiência dos sistemas produtivos das empresas. A manutenção é uma das áreas que promove o aumento destes parâmetros e possibilita a redução de paragens não programadas, a maior disponibilidade de equipamentos, a redução de custos e o aumento da produtividade.

No entanto, o estudo da manutenção potencializou o aparecimento de novas abordagens mais focadas na fiabilidade e na monitorização da condição dos equipamentos, como é o caso da manutenção preditiva.

A presente dissertação tem como objetivo a implementação de manutenção preditiva em bombas de vácuo de anel líquido, na empresa ATEP – *Amkor Technology Portugal, S.A.*.

O estudo baseou-se na criação de dois sistemas de monitorização da condição das bombas de vácuo de anel líquido e no desenvolvimento de planos de manutenção preventiva para estes equipamentos. O primeiro sistema implementado permitiu analisar a aplicação de sensores de baixo custo através da linguagem de programação *Arduino*, funcionando como um sistema *offline*. Por fim, o segundo sistema implementado consistiu na aplicação de sensores de melhor qualidade permitindo assim, recolher dados relevantes acerca do normal funcionamento do equipamento para posteriormente prever o momento de ocorrência de falha e/ou avaria.

Com isto, deu-se o aprimoramento das ações de manutenção, otimização dos indicadores-chave de desempenho, redução de custos associados à manutenção e garantia da qualidade do produto final.

No sistema *offline* reduziu-se 67% o MTTR, 88% o período máximo de manutenção, em 31% o período mínimo de manutenção e 40% os custos de manutenção.

No sistema *online*, o MTTR reduziu 63%, os custos de manutenção reduziram 56% e os períodos máximo e mínimo de manutenção reduziram 92% e 23%, respetivamente.

KEYWORDS

Maintenance, Predictive Maintenance, Condition-Based Maintenance, Reliability-Centered Maintenance, Sensorization

ABSTRACT

The increase of industrial competitiveness and the search for excellence in management provided the incessant demand for new management strategies, strategies that would increase the effectiveness and efficiency of the companies production systems. Maintenance is one of the areas that promotes the increase of these parameters and enables the reduction of unscheduled stops, the greater equipment availability, costs reduction and the increase of productivity.

However, maintenance study potentiated new approaches emergence more focused on reliability and on condition monitoring of equipment, such as predictive maintenance.

This dissertation aims to implement predictive maintenance on liquid ring vacuum pumps, in ATEP – Amkor Technology Portugal, S.A..

This study was based on the creation of two systems to monitor liquid ring vacuum pump condition and development preventive maintenance plans for these equipments. The first implemented system allowed analyzing the application of low-cost sensors through Arduino programming language, working as an offline system. Finally, the second system implemented consisted of the application of better quality sensors, thus allowing relevant data collection about the normal operation of the equipment to later predict a failure and/or breakdown moment.

As a result, maintenance actions were improved, key performance indicators were optimized, maintenance costs were reduced and the product final quality was guaranteed.

In offline system, MTTR was reduced by 67%, the maximum maintenance period by 88%, the minimum maintenance period by 31% and maintenance costs was reduced by 40%.

In online system, MTTR reduced by 63%, maintenance costs reduced by 56% and maximum and minimum maintenance periods reduced by 92% and 23%, respectively.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i>
BCG	<i>Boston Consulting Group</i>
CBM	<i>Condition-Based Maintenance</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
DT	<i>Digital Twin</i>
EN	<i>European Normalization</i>
ES	<i>Expert System</i>
EUA	Estados Unidos da América
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Modes Effects and Criticality Analysis</i>
I-MR	<i>Individuals chart and Moving Range chart</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KPI's	<i>Key Performance Indicators</i>
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
LRVP	<i>Liquid-Ring Vacuum Pump</i>
MEMS	<i>Micro-Electromechanical Systems</i>
MPU	<i>Motion Processing Unit</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>

MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NP	Norma Portuguesa
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OSAT	<i>Outsourced Semiconductor Assembly and Test</i>
RCM	<i>Reliability-Centered Maintenance</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
UE	União Europeia

Lista de Unidades

%rH	Percentagem de Humidade Relativa
°C	Graus Celsius
dB	Decíbeis
g	Aceleração da Gravidade
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
m/s²	Metros por segundo ao quadrado
mbar	Milibar
mm/s	Milímetros por segundo

Lista de Símbolos

%	Percentagem
---	-------------

€	Moeda Euro
---	------------

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Alternating Current</i>	Corrente Alternada
<i>Benchmarking</i>	Em português significa ponto de referência e é um processo de pesquisa entre empresas do mesmo setor para analisar a forma como os seus produtos, processos e serviços estão a ser desempenhados em relação aos concorrentes.
<i>Big Data</i>	É o conjunto de informações presentes em bases de dados de servidores e empresas, que pode ser acedido e possui interligações entre si.
<i>Boston Consulting Group</i>	Grupo de Consultoria de <i>Boston</i>
<i>Computer Numerical Control</i>	Controlo Numérico Computorizado
<i>Condition-Based Maintenance</i>	Manutenção Baseada na Condição
<i>Digital Twin</i>	Gémeo Digital
<i>Downtime</i>	Tempo em que um sistema, processo ou atividade não está operacional.
<i>European Normalization</i>	Norma Europeia
<i>Expert System</i>	Sistema Inteligente
<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>	Análise de Modos e Efeitos das Falhas
<i>Failure Modes and Effects Criticality Analysis</i>	Análise de Modos, Efeitos e Criticidade das Falhas

<i>Grinding & Mount</i>	Processo do setor de <i>WaferPrep</i> , onde ocorre o desbaste e a montagem das <i>wafers</i> de silício.
<i>Individuals chart and Moving Range chart</i>	Carta de valores individuais e carta de amplitude móvel
<i>International Organization for Standardization</i>	Organismo Internacional para a Normalização
<i>Key Performance Indicators</i>	Indicadores-Chave de Desempenho
<i>Life Cycle Cost</i>	Custo de Vida do Ciclo
<i>Liquid Ring Vacuum Pump</i>	Bomba de Vácuo de Anel Líquido
<i>Mean Time Between Failure</i>	Tempo Médio Entre Falhas
<i>Mean Time To Repair</i>	Tempo Médio de Reparação
<i>Micro-Electromechanical System</i>	Microssistema Eletromecânico
<i>Motion Processing Unit</i>	Unidade de Processamento de Movimento
<i>Overall Equipment Effectiveness</i>	Eficiência Global do Equipamento
<i>Outsourced Semiconductor Assembly and Test</i>	Montagem e Teste de Semicondutores Terceirizados

<i>Reliability-Centred Maintenance</i>	Manutenção Centrada na Fiabilidade
<i>Risk Priority Number</i>	Número de Prioridade de Risco
<i>Total Cost of Ownership</i>	Custo Total de Propriedade
<i>Total Productive Maintenance</i>	Manutenção Produtiva Total
<i>WaferPrep</i>	Setor de produção, na indústria dos semicondutores, que tem como objetivo preparar as <i>wafers</i> de silício para o corte e assim, individualizar unidades.
<i>Wafers</i>	Placas de semicondutores realizadas com silício e utilizadas como base para a obtenção de chips.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Metodologia <i>Action Research</i> (Adaptado de (Eden & Ackermann, 2018)).....	3
Figura 2 - Relação entre manutenção e qualidade (Adaptado de (Adolfsson & Dahlström, 2011))	9
Figura 3 - Gerações da manutenção (Adaptado de (Moubray, 1997))	10
Figura 4 - Classificação dos diferentes tipos de manutenção (Adaptado de (Ben-Daya <i>et al.</i> , 2009)).....	12
Figura 5 - Classificação dos diferentes tipos de manutenção (Adaptado de (Kardec & Lafraia, 2002)).....	13
Figura 6 - Fases da manutenção preditiva (Adaptado de (Ayo-Imoru & Cilliers, 2018))	18
Figura 7 - Fatores de análise na adoção de política de manutenção preditiva (Kardec & Nascif, 2012)....	20
Figura 8 - Processo de implementação da filosofia RCM (Adaptado de (Márquez <i>et al.</i> , 2009))	29
Figura 9 - Esquema básico de um sensor (Adaptado de (Javaid <i>et al.</i> , 2021))	35
Figura 10 - Relação entre deslocamento, velocidade e aceleração (Adaptado de (Scheffer & Girdhar, 2004))	37
Figura 11 - Resposta do acelerómetro vs frequência nos diversos tipos de montagem (a – com pinos; b – magnética; c – não permanente) (Adaptado de (Scheffer & Girdhar, 2004)).....	39
Figura 12 - Resumo da ATEP e de todo o grupo multinacional	43
Figura 13 - Resumo da história da empresa e produtos comercializados ao longo dos anos	44
Figura 14 - Produtos comercializados pela <i>Amkor Technology Portugal, S.A.</i>	45
Figura 15 – Resumo do processo de implementação de manutenção preditiva	47
Figura 16 - Esquema de funcionamento das bombas de vácuo de anél líquido (Adaptado de (Zhang <i>et al.</i> , 2021))	48
Figura 17 - Detritos metálicos provenientes do interior da bomba	49
Figura 18 - Detritos metálicos e oxidação do interior da bomba	49
Figura 19 - Má condição dos rolamentos	49
Figura 20 - Rolamento oxidado	49
Figura 21 - Rotor danificado.....	50
Figura 22 - Lâmina do rotor quebrada.....	50
Figura 23 - Vedantes com perda de forma	50
Figura 24 - Vedante com presença de oxidação	50

Figura 25 - Palhetas novas	51
Figura 26 - Palhetas em mau estado	51
Figura 27 - Análise FMEA aos rolamentos, ao veio e ao rotor.....	55
Figura 28 - Previsão da redução do RPN após ações tomadas	56
Figura 29 - Plano de manutenção preventiva do sistema <i>offline</i>	57
Figura 30 - Plano de manutenção preventiva do sistema <i>online</i>	58
Figura 31 - Esquema de funcionamento do sistema de monitorização da condição <i>offline</i>	60
Figura 32 - Sensor MPU-6050	61
Figura 33 - Computador e <i>Arduino</i>	61
Figura 34 - Máquina.....	61
Figura 35 - Esquema de funcionamento do sistema de monitorização da condição <i>online</i>	63
Figura 36 - Sensor STEVAL-STWINKT1B implementado	64
Figura 37 - Sensor implementado	64
Figura 38 - Análise das variáveis de entrada no sistema <i>offline</i>	66
Figura 39 - Exemplo de amostra diária recolhida	67
Figura 40 - Amostras organizadas em Excel	67
Figura 41 - Gráfico do comportamento da variável A_x no período em análise	68
Figura 42 - Gráfico do comportamento da variável A_z no período em análise	69
Figura 43 - Gráfico do comportamento da variável Temperatura no período em análise	70
Figura 44 - Gráfico do comportamento da variável A_y no período de análise	70
Figura 45 - Gráfico do comportamento da variável Aceleração nos períodos antes e após ocorrência de falha.....	71
Figura 46 - Gráfico do comportamento da variável Velocidade nos períodos antes e após ocorrência de falha.....	72
Figura 47 - Gráfico do comportamento da variável Emissões Acústicas nos períodos antes e após ocorrência de falha.....	73
Figura 48 - Gráfico do comportamento da variável Temperatura nos períodos antes e após ocorrência de falha.....	74
Figura 49 - Gráfico do comportamento da variável Humidade Relativa nos períodos antes e após ocorrência de falha.....	75

Figura 50 - Gráfico do comportamento da variável Pressão nos períodos antes e após ocorrência de falha	75
Figura 51 - Fluxograma de apoio à decisão para o sistema <i>online</i>	77
Figura 52 - Previsão da percentagem de redução de <i>KPI's</i> no período de cinco anos (Sistema <i>offline</i>)	79
Figura 53 - Gráfico de comparação entre a previsão de custos antes e após implementação de planos de manutenção (Sistema <i>offline</i>).....	81
Figura 54 - Previsão da percentagem de redução de <i>KPI's</i> no período de cinco anos (Sistema <i>online</i>)	83
Figura 55 - Gráfico de comparação entre a previsão de custos antes e após implementação de planos de manutenção (Sistema <i>online</i>)	84
Figura 56 - Limites de operacionalidade no sistema <i>online</i>	90
Figura 57 - Previsão da percentagem de redução dos <i>KPI's</i> nos dois sistemas, num período de cinco anos	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Caraterização do termo Manutenção	7
Tabela 2 - Caraterização do conceito Gestão da Manutenção	10
Tabela 3 - Objetivos da manutenção (Adaptado de (Márquez, 2007))	11
Tabela 4 - Caraterização das diferentes vertentes da manutenção indicadas por Kardec & Lafraia (Kardec & Lafraia, 2002)	13
Tabela 5 - Caraterização da estratégia SMART (Adaptado de (Kerzner, 2011))	15
Tabela 6 - Classes de <i>KPI's</i> e exemplos (adaptado de (Smith & Hawkins, 2004))	16
Tabela 7 - Caraterização do conceito Manutenção Preditiva	17
Tabela 8 - Níveis de maturidade da manutenção preditiva (Adaptado de (Sahba <i>et al.</i> , 2021))	19
Tabela 9 - Etapas a seguir para alcançar a manutenção preditiva (Adaptado de (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019))	21
Tabela 10 - Vantagens e desvantagens da implementação de manutenção preditiva segundo (Pereira, 2009; Pinto, 2013)	23
Tabela 11 - Vantagens e desvantagens da implementação da manutenção preditiva segundo (Mechefske, 2005)	23
Tabela 12 - Aplicações práticas de casos de estudo acerca da manutenção preditiva	24
Tabela 13 - Vantagens e desvantagens da implementação da manutenção centrada na fiabilidade	27
Tabela 14 - Aplicações práticas de casos de estudo acerca da manutenção centrada na fiabilidade	30
Tabela 15 - Tipos de sensores e as respetivas aplicações na indústria (Adaptado de (Javaid <i>et al.</i> , 2021))	35
Tabela 16 - Faixas de frequência e breve descrição (Scheffer & Girdhar, 2004)	37
Tabela 17 - Tipos de montagem de acelerómetros	38
Tabela 18 - Interligação entre a fase operacional do equipamento e o modo de falha	51
Tabela 19 - Análise das condições de implementação de manutenção preditiva	52
Tabela 20 - Análise e resposta às questões propostas por alguns dos autores mais conceituados na área da manutenção preditiva	53
Tabela 21 - Descrição do sistema <i>offline</i> , componentes e a sua função e custos	59
Tabela 22 - Descrição do sistema <i>online</i> , componentes e a sua função e custos	62

Tabela 23 - Definição dos <i>KPI's</i> da bomba de vácuo comparativamente a um tipo de ação de manutenção recorrente, na WLPBSG-0004	78
Tabela 24 - Definição dos <i>KPI's</i> da bomba de vácuo comparativamente a um tipo de ação de manutenção recorrente, na WLPGMP-0005	81
Tabela 25 - Descrição dos objetivos traçados inicialmente e a forma como foram cumpridos	88

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	METODOLOGIA.....	2
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
1.5	LOCAL/EMPRESA DE ACOLHIMENTO.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	MANUTENÇÃO	7
2.1.1	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MANUTENÇÃO	9
2.1.2	GESTÃO DA MANUTENÇÃO	10
2.1.3	FUNÇÕES DA MANUTENÇÃO.....	11
2.1.4	TIPOS DE MANUTENÇÃO	12
2.1.5	INDICADORES-CHAVE DE DESEMPENHO	15
2.2	MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	16
2.2.1	CONDIÇÕES PARA IMPLEMENTAR MANUTENÇÃO PREDITIVA	19
2.2.2	PRINCÍPIOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA	21
2.2.3	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	22
2.2.4	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA	22
2.2.5	APLICAÇÕES PRÁTICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	24
2.3	MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE	26
2.3.1	PRINCÍPIOS DA METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE	28
2.3.2	PROCESSO DE METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE.....	28
2.3.3	ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DAS FALHAS	29

2.3.4	APLICAÇÕES PRÁTICAS DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE	30
2.4	INDÚSTRIA 4.0 E SENSORIZAÇÃO	33
2.4.1	RECOLHA DE DADOS	35
2.4.2	APLICAÇÃO DE SENSORES NA INDÚSTRIA 4.0	36
2.4.3	ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	36
3	DESENVOLVIMENTO	43
3.1	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA E DOS PROCESSOS PRODUTIVOS	43
3.1.1	PRODUTOS E SERVIÇOS DA EMPRESA	44
3.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	45
3.2.1	DESCRIÇÃO DAS BOMBAS DE VÁCUO DE ANEL LÍQUIDO	47
3.2.2	COMPLICAÇÕES COMUNS NAS BOMBAS DE VÁCUO DE ANEL LÍQUIDO	48
3.2.3	TIPOS DE AVARIAS E AS RESPECTIVAS CAUSAS	51
3.3	ANÁLISE DE CONDIÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	52
3.4	ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS	54
3.5	PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	56
3.6	PLANOS DE AÇÃO	58
3.6.1	SISTEMA DE RECOLHA DE DADOS <i>OFFLINE</i>	59
3.6.1.1	VARIÁVEIS DE ENTRADA NO SISTEMA OFFLINE	61
3.6.2	SISTEMA DE RECOLHA DE DADOS <i>ONLINE</i>	62
3.6.2.1	VARIÁVEIS DE ENTRADA NO SISTEMA ONLINE	64
3.6.3	MÉTODOS DE ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA	65
3.6.3.1	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA NO SISTEMA OFFLINE	65
3.6.3.2	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA NO SISTEMA ONLINE	66
3.7	DEFINIÇÃO DOS VALORES-LIMITE OPERACIONAIS	67
3.7.1	VALORES-LIMITE OPERACIONAIS NO SISTEMA <i>OFFLINE</i>	68
3.7.2	VALORES-LIMITE OPERACIONAIS NO SISTEMA <i>ONLINE</i>	71
3.8	DEFINIÇÃO DOS INDICADORES-CHAVE DE DESEMPENHO	77

3.8.1	<i>KPI'S ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA OFFLINE</i>	78
3.8.2	<i>KPI'S DEPOIS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA OFFLINE</i>	79
3.8.3	<i>KPI'S ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ONLINE</i>	81
3.8.4	<i>KPI'S DEPOIS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ONLINE</i>	82
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	87
4.1	CONCLUSÕES.....	87
4.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	91
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	95

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1.5 LOCAL/EMPRESA DE ACOLHIMENTO

1 INTRODUÇÃO

Os seguintes subcapítulos têm o intuito de apresentar em que contexto foi elaborado e desenvolvido todo este trabalho, os seus objetivos, a metodologia seguida e adotada, a estrutura de toda a dissertação e para finalizar, uma breve apresentação da empresa de acolhimento.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O mercado mundial, desde a sua fase primordial até aos dias de hoje, foi alvo de enormes mudanças a todos os níveis. Atualmente, o mercado caracteriza-se por ser extremamente dinâmico e, por esse motivo, a procura pelo conhecimento e estudo de metodologias de gestão são requisitos para a obtenção dos resultados pretendidos. Estes dinamismos aliados à recessão económica requerem, não só de novas abordagens como também de estratégias de gestão inovadoras, que assim contribuam para o desenvolvimento, para a preservação e para o crescimento contínuo das empresas.

O aumento da competitividade industrial, levou todos os gestores a refletirem acerca de novas estratégias que permitissem aumentar a eficácia e a eficiência dos sistemas produtivos das empresas. Posto isto, a disponibilidade de equipamentos, os custos associados a paragens, a qualidade dos produtos, a utilização de menos recursos, consequentemente, o aumento da produtividade, influenciavam o aproveitamento máximos dos sistemas produtivos. A conjugação de todos estes fatores e o aproveitamento máximo da produção remeteram os gestores para a importância da manutenção.

A manutenção expressa-se significativamente nos custos totais das empresas, e por esse motivo há que delinear estratégias para se atingir a redução de custos, o aumento da disponibilidade de equipamentos, a qualidade dos produtos e a maximização da linha produtiva.

O avanço e exponencial crescimento tecnológico, permitiram o aparecimento da manutenção preditiva ou manutenção baseada na condição, manutenção que proporciona excelentes resultados e permite a obtenção dos resultados expectáveis, pelas organizações, de forma automatizada. Portanto, esta faceta da manutenção permite a monitorização da condição do equipamento ao segundo, através da

implementação de sensores capazes de medir diversos parâmetros. Com isto, a ocorrência de falhas e/ ou avarias são possíveis de prever e, assim, agir de forma estratégica no planeamento de ações de manutenção, protegendo o sistema produtivo de paragens não-planeadas, reduzindo-se custos associados à manutenção e aumentando a disponibilidade dos equipamentos.

Na indústria dos semicondutores, todas as paragens não-planeadas são críticas e pode comprometer a qualidade do produto final, sendo que este decréscimo de qualidade gera enormes prejuízos à empresa. No setor do *WaferPrep*, as máquinas de *Grinding & Mount*, necessitam de bombas de vácuo de anel líquido sempre em funcionamento, no entanto estas sofrem diversas falhas e avarias, tendo um custo de aquisição bastante elevado. As falhas mais comuns são resultantes do alto nível de oxidação dos componentes, devido ao fluído de trabalho que contém partículas de silício. Por esse motivo, é oportuno o estudo e a implementação de um sistema de monitorização da condição das bombas de vácuo de anel líquido, de forma a detetar complicações, a evitar paragens não-programadas e a reduzir nos custos de aquisição destas máquinas.

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como desígnio o estudo, desenvolvimento e implementação de manutenção preditiva, num processo produtivo da empresa ATEP – *Amkor Technology* Portugal, S.A.. A implementação de manutenção preditiva, no setor de desbaste e montagem, pretende facilitar a identificação da necessidade de manutenção nas bombas de vácuo e, com isto, não comprometer a qualidade do produto final, bem como reduzir as despesas na aquisição destes componentes. Além dos objetivos referenciados anteriormente, este estudo e implementação também tiveram, os seguintes objetivos:

- Implementar o primeiro sistema de manutenção preditiva na empresa;
- Aumentar a eficácia e a eficiência da manutenção e, com isto, melhorar todo o processo produtivo e aumentar a disponibilidade de equipamentos;
- Melhorar o planeamento de ações de manutenção preventivas;
- Envolver os colaboradores com o sistema implementado;
- Monitorizar e estabelecer valores de referência, no que toca a parâmetros, como por exemplo, aceleração, deslocamento, temperatura, humidade relativa e pressão;
- Garantir a qualidade do produto final.

1.3 METODOLOGIA

A fase de iniciação da dissertação é de extrema importância, já que pode ser caracterizada pela etapa de definição do trabalho a realizar, etapa esta necessária para

alcançar os objetivos traçados e, assim sendo, foi adotada uma metodologia de investigação que se enquadra nos princípios de *Action Research*. A metodologia *Action Research* encontra-se ilustrada na Figura 1.



Figura 1 - Metodologia *Action Research* (Adaptado de (Eden & Ackermann, 2018))

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, seguindo uma sequência lógica que proporciona a sua fácil leitura e interpretação.

Inicialmente, o primeiro capítulo consiste na exposição e apresentação do trabalho desenvolvido, contextualizando e enquadrando todo o projeto. Posteriormente, são apresentados os objetivos a alcançar e é indicada a metodologia adotada para cumprir com os objetivos propostos. Por fim, é exposta a empresa de acolhimento do estágio curricular.

Em seguida, o segundo capítulo é referente à revisão bibliográfica, ou seja, este capítulo consiste na abordagem dos diversos temas de destaque para a compreensão, fundamentação e sustentação e todo o projeto desenvolvido.

Posteriormente, o terceiro capítulo destina-se ao desenvolvimento. É apresentado o contexto de todo o projeto desenvolvido, nomeadamente, a apresentação da empresa

de acolhimento, descrição do problema, a análise de condições de implementação de manutenção preditiva, análise de modos e efeitos de falhas, a criação dos planos de manutenção preventiva, os planos de ação, a definição dos valores-limite operacionais e por último, a caracterização e definição dos indicadores-chave de desempenho.

O quarto capítulo apresenta as diversas conclusões retiradas após a implementação de manutenção preditiva nas bombas de vácuo de anel líquido, bem como as propostas de melhoria e os trabalhos futuros a desenvolver.

Por fim, o quinto capítulo compreende toda a bibliografia necessária à realização da dissertação.

1.5 LOCAL/EMPRESA DE ACOLHIMENTO

Esta dissertação desenvolveu-se com base num estágio curricular na empresa *Amkor Technology* Portugal, S.A., situada em Vila do Conde. A empresa é especializada na área de produção de semicondutores, ou seja, *microchips* de memórias ultrarrápidas para serem utilizadas em produtos de elevado desempenho relacionados ao setor das telecomunicações, ao ramo automóvel, infraestruturas, na indústria aeronáutica, no setor da saúde, entre outras áreas de consumo.

A implementação de manutenção preditiva nas bombas de vácuo de anel líquido necessitou da utilização de sensores, da programação dos mesmos, análise e tratamento de dados através de métodos estatísticos e de ferramentas da qualidade, abordagens relacionadas à manutenção centrada na fiabilidade, avaliações acerca da fiabilidade do sistema implementado e otimização deste.

O estágio curricular iniciou-se a 6 de setembro de 2021 e terminou a 14 de março de 2022, sob a orientação do Engenheiro Hugo Ricardo de Oliveira Barros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUTENÇÃO

2.2 MANUTENÇÃO PREDITIVA

2.3 MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE

2.4 INDÚSTRIA 4.0 E SENSORIZAÇÃO

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Revisão Bibliográfica tem como finalidade a exploração e a abordagem de diversos conhecimentos ao nível da manutenção preditiva, da manutenção centrada na fiabilidade, da indústria 4.0 e da sensorização, de modo a não só fundamentar, como também a sustentar todo o projeto a desenvolvido.

2.1 MANUTENÇÃO

Segundo a norma NP EN 13306:2017, o termo avaria corresponde à cessação da capacidade de um bem para cumprir uma função requerida, já falha é definida como um evento indesejável.

Isermann (Isermann, 2011) descreve avaria como sendo um estado inerente ao sistema, que caracteriza-se pelo desvio de pelo menos umas das suas propriedades características, para além de um determinado limite de tolerância, causando uma redução, ou até mesmo a perda da capacidade funcional do sistema. No entanto, a principal diferença entre falha e avaria está no facto de a avaria corresponder à falha de um sistema e a falha a um dado evento.

A avaria e a falha estão diretamente ligadas ao termo manutenção e, por esse motivo, a caracterização da manutenção deve ser realizada, tendo em conta os mais diversos autores no setor, tal como na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização do termo Manutenção

Autores	Definição
(Moubray, 1997)	Define manutenção como o assegurar que todos os ativos físicos continuem a fazer o que os utilizadores querem que eles façam.
(Marinho <i>et al.</i> , 2021)	A manutenção representa um conjunto de medidas e ações que garantem a prevenção, a preservação e a reposição dos equipamentos para um estado anterior ou para um estado

	permissível de realizar um determinado serviço, aliado à minimização de custos de manutenção.
(M. Smith & Hinchcliffe, 2003)	A manutenção tem como objetivo preservar as capacidades funcionais de equipamentos e sistemas em operação, evitando e solucionando as falhas.
NP EN 13306:2017	A manutenção pode ser definida como a combinação de todas as ações, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou a repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida.
(Pinto, 2013)	Declara a manutenção como um conjunto de ações que se efetuam ao longo da vida de uma máquina, mantendo e repondo a operacionalidade da mesma. Assim, a manutenção deve ser capaz de garantir a qualidade, disponibilidade e segurança dos equipamentos de forma económica e rentável.

A manutenção é uma importante função organizacional, necessária para apoiar processos relacionados à produção. As avarias na produção afetam diretamente a saída dos processos e, portanto, a lucratividade. As empresas têm diferentes visões acerca de como a manutenção pode ser utilizada. Tradicionalmente, é vista como uma necessidade indesejável, tendo relações complexas com as outras funções da empresa (Adolfsson & Dahlström, 2011).

A Figura 2 estabelece a relação entre a manutenção e a qualidade segundo Adolfsson & Dahlstrom (Adolfsson & Dahlström, 2011).

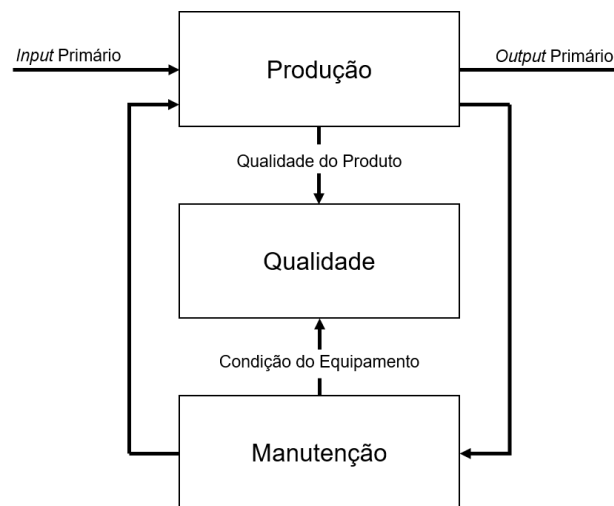


Figura 2 - Relação entre manutenção e qualidade (Adaptado de (Adolfsson & Dahlström, 2011))

Nos últimos anos a manutenção passou por diversas mudanças, mudanças essas maiores do que em qualquer outra atividade. Estas variações devem-se ao aumento, bastante rápido, da quantidade e da diversidade de equipamentos, instalações e sistemas que têm que ser mantidos, novas técnicas de manutenção, projetos com um nível de complexidade bastante mais elevado, prioridades sobre a organização da manutenção e as suas responsabilidades e por fim, a importância da manutenção como função estratégica de modo a aumentar a competitividade das organizações e a fomentar melhores resultados negociais (Kardec & Nascif, 2012).

2.1.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MANUTENÇÃO

Quando as indústrias surgiram, estas não só eram básicas como também pouco mecanizadas (Kobbacy & Murthy, 2008). Assim sendo, a primeira ação de manutenção a ser utilizada foi a manutenção corretiva, já que as empresas ambicionavam a maior produtividade possível, mantendo os equipamentos sempre em funcionamento, com a inexistência de qualquer tipo de gestão ou estratégia de manutenção (Simões *et al.*, 2016).

Moubray (Moubray, 1997) caracteriza a evolução da manutenção em três gerações. A primeira geração, entre a década de 40 a 50, recorria à manutenção corretiva para repor um bem, ou seja, só existia uma ação de manutenção quando a máquina avariava ou falhava. Em seguida, veio a era da segunda geração, entre a década de 50 a 70, realizada tendo em conta planeamentos e controlo de atividades. Por fim, a terceira geração, com data de fim no ano de 2000, designada por geração da monitorização, tinha como principal foco a fiabilidade e a análise de modos e efeitos das falhas. A Figura 3 representa a evolução citada anteriormente.

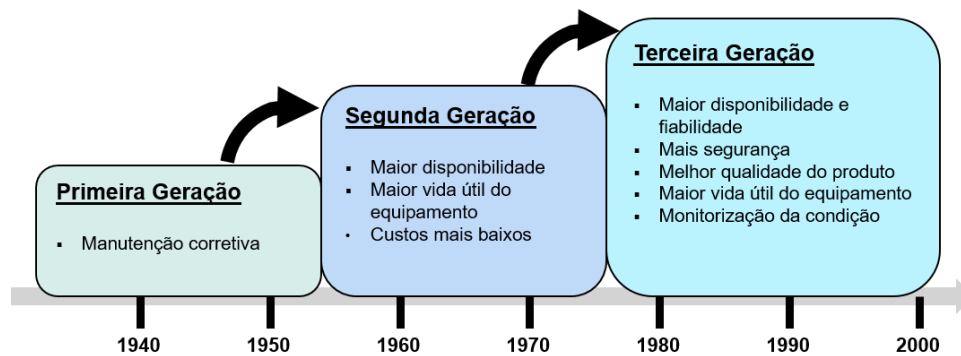


Figura 3 - Gerações da manutenção (Adaptado de (Moubray, 1997))

2.1.2 GESTÃO DA MANUTENÇÃO

O conceito Gestão da Manutenção está diretamente ligado à manutenção e às suas ações em si, por esse motivo é caracterizado por alguns autores na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização do conceito Gestão da Manutenção

Autores	Definição
NP EN 13306:2017	A gestão da manutenção são todas as atividades de gestão que determinam os objetivos, a estratégia e as responsabilidades respeitantes à manutenção e que as implementam por diversos meios tais como o planeamento, o controlo e a supervisão da manutenção e a melhoria de métodos na organização, incluindo os aspetos económicos.
(Oliveira, 2017)	A gestão da manutenção é considerada estratégica quando está voltada para os resultados empresariais da organização. E isso implica que, além de ter de garantir a disponibilidade funcional dos equipamentos e instalações de um processo produção ou serviço, a gestão da manutenção precisa aliar os fatores de fiabilidade, segurança, preservação ambiental e custos moderados.
(Kardec & Nascif, 2012)	A gestão da manutenção é o pensar e agir estrategicamente, para que a atividade de manutenção se integre de forma eficaz a todo o processo produtivo da empresa,

contribuindo, assim, para o alcançar da excelência empresarial.

Segundo Márquez (Márquez, 2007), o papel da gestão da manutenção para o negócio tem em vista a gestão de todos os ativos à maximização do retorno do investimento nos ativos, tal como representado na Tabela 3.

Tabela 3 - Objetivos da manutenção (Adaptado de (Márquez, 2007))

Objetivos da gestão da manutenção	Descrição
Técnicos	Garantir a disponibilidade e capacidade do equipamento, a atualização tecnológica e a segurança das pessoas e ambiente (<i>security</i>).
Requisitos legais e regulamentos	Por exemplo, requisitos de instalações e segurança contra incêndios e terremotos (<i>safety</i>).
Financeiros	Por exemplo, minimização do <i>Life Cycle Cost</i> e do <i>TCO</i> .

2.1.3 FUNÇÕES DA MANUTENÇÃO

Segundo Higgins (Higgins, 2008), a manutenção tem dois tipos de funções:

- Funções primárias, tais como:
 - Manutenção dos equipamentos da fábrica, instalação e desmantelamento;
 - Manutenção dos edifícios e infraestruturas circundantes;
 - Alterações a edifícios e equipamentos;
 - Lubrificação e inspeção dos equipamentos;
 - Realização de novas instalações.
- Funções secundárias, como por exemplo:
 - Gestão de armazéns;
 - Proteção de fábricas e instalações;
 - Gestão de equipamentos obsoletos e sucatas;
 - Administração de incidentes e de participações ao seguro;
 - Gestão de resíduos.

2.1.4 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Segundo Ferreira (Ferreira *et al.*, 2019), a manutenção pode ser dividida em duas categorias: Reativa e Proativa. A manutenção reativa é descrita como a reparação após a ocorrência de paragem, já a manutenção proativa foca-se no inverso da anterior, isto é, tenta colmatar anomalias da ocorrência de paragem.

A Figura 4 representa o modelo proposto por Ben-Daya (Ben-Daya *et al.*, 2009), citado por Ferreira (Ferreira *et al.*, 2019).

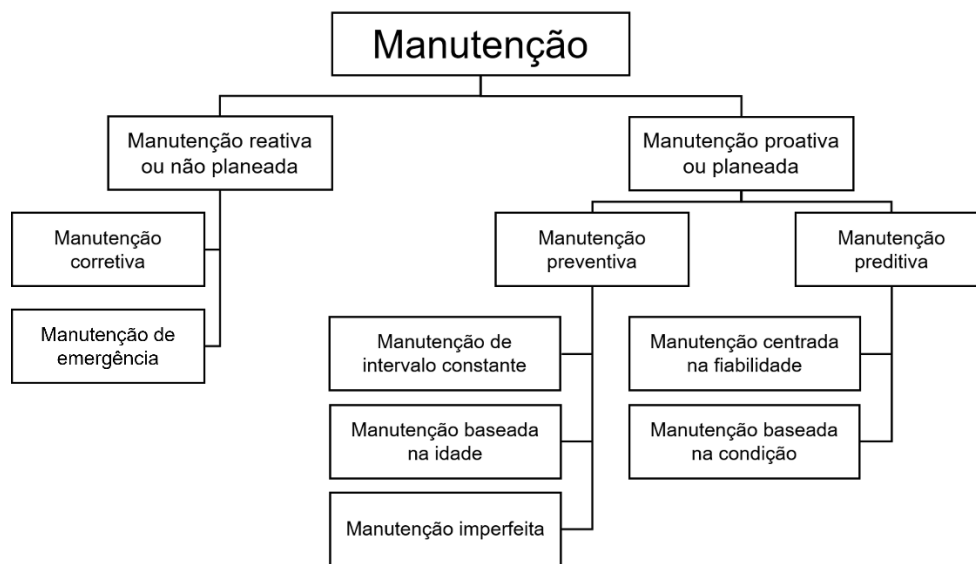


Figura 4 - Classificação dos diferentes tipos de manutenção (Adaptado de (Ben-Daya *et al.*, 2009))

No entanto, autores como Kardec & Lafraia (Kardec & Lafraia, 2002) dividem a manutenção em seis tipos: manutenção corretiva não planeada, manutenção corretiva planeada, manutenção preventiva, manutenção preditiva, manutenção de deteção e engenharia de manutenção. As atividades corretivas e preventivas pertencem a qualquer unidade industrial, sendo que a metodologia de gestão utilizada por cada organização determinará o resultado, como representado na Figura 5 (Kardec & Lafraia, 2002).

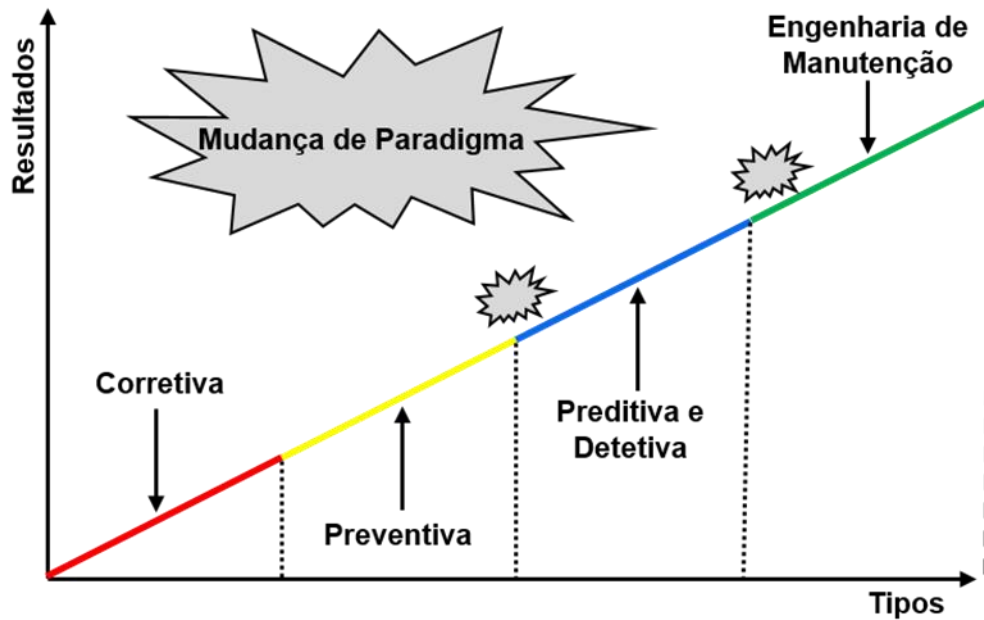


Figura 5 - Classificação dos diferentes tipos de manutenção (Adaptado de (Kardec & Lafraia, 2002))

As seis diferentes vertentes indicadas por Kardec & Lafraia (Kardec & Lafraia, 2002) encontram-se caracterizadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização das diferentes vertentes da manutenção indicadas por Kardec & Lafraia (Kardec & Lafraia, 2002)

Tipos de manutenção	Descrição
Manutenção corretiva não planeada	A manutenção corretiva não planeada geralmente acontece depois da ocorrência da falha e inclui ações de reparação e de substituição. Este tipo de manutenção é de alto risco para as empresas, já que promove a existência de paragens não programadas e danos maiores nas máquinas (Y. Chen <i>et al.</i> , 2017).
Manutenção corretiva planeada	Correção do desempenho ou da falha menor do que o esperado, sendo que decisão tomada por parte da gestão, já que se baseia na análise e acompanhamento preditivo. A manutenção corretiva planeada é bastante dependente da qualidade da informação fornecida pelo acompanhamento do sistema e/ou equipamento (Kardec & Nascif, 2012).

	<p>A manutenção preventiva baseia-se no tomar de uma série de decisões relativas à manutenção, antes de ocorrerem falhas e danos nos equipamentos (France-Mensah & O'Brien, 2019).</p>
Manutenção preventiva	<p>Apoiando-se em intervalos de tempo pré-estabelecidos, ou na quantidade de unidades de uso, a manutenção preventiva prolonga a vida útil do equipamento, melhora o seu desempenho, reduz desperdícios e custos associados à manutenção (Li <i>et al.</i>, 2022).</p>
	<p>A manutenção preditiva, uma das mais modernas abordagens da manutenção, utiliza as informações prognósticas acerca da futura condição do sistema para determinar quando são necessárias ações de manutenção (Vu <i>et al.</i>, 2021).</p>
Manutenção preditiva	<p>A principal característica da manutenção preditiva centra-se no alerta de existência de anomalias no ativo, este alerta promove a redução do número de ações de manutenção desnecessárias, ao contrário do que acontece na manutenção preventiva, prolonga a vida útil do equipamento e consequentemente, os custos associados à manutenção reduzem (Jardine <i>et al.</i>, 2006).</p>
	<p>A manutenção de deteção é caracterizada pela ação realizada em sistemas de proteção, comando e controlo, tendo como principal objetivo detetar falhas ocultas ou não perceptíveis aos colaboradores de operação e manutenção (Kardec & Nascif, 2012).</p>
Manutenção de deteção	
	<p>A engenharia de manutenção é uma quebra de paradigma na manutenção e aplicá-la significa uma mudança cultural. Consideram que é uma manutenção de melhoria, faz uso de técnicas inovadoras, procura <i>benchmarks</i>, promovendo aumento da fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade, segurança e tem como objetivo, eliminar problemas crónicos, solucionar problemas tecnológicos, acompanhar indicadores, elaborar planos de inspeção e manutenção, bem como zelar por toda a documentação técnica e legal (Kardec & Nascif, 2012).</p>
Engenharia de manutenção	

2.1.5 INDICADORES-CHAVE DE DESEMPENHO

A avaliação de desempenho falha em todo o Mundo, desde empresas multinacionais, departamentos governamentais até às organizações sem fins lucrativos. Estas avaliações, recorrendo a indicadores-chave de desempenho, devem ajudar as organizações em todas as atividades diárias com os objetivos estratégicos da organização (Parmenter, 2015).

Os *KPI's* – *Key Performance Indicators* (Indicadores-chave de desempenho) são métricas que avaliam o desempenho de uma organização ou uma pessoa numa determinação de ação operacional, tática ou estratégica que é crítica para o sucesso presente e futuro da organização (Kerzner, 2011).

A análise de *KPI's* permite a todos os colaboradores duma empresa, desde operadores até à gestão de topo, acompanhar o desempenho real, de forma a comprar esse desempenho com os objetivos e resultados previstos, e com isso implementar medidas, tendo em vista a melhoria contínua desses indicadores (Zhu *et al.*, 2018).

Kerzner (Kerzner, 2011) indica que para se desenvolver, definir e estabelecer objetivos em projetos é necessário adotar a estratégia *SMART*, caracterizada na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização da estratégia SMART (Adaptado de (Kerzner, 2011))

SMART	Descrição
<i>S = Specific</i> (Específica)	O KPI é sucinto e focado não só desempenho dos objetivos, como também no propósito do negócio.
<i>M = Measurable</i> (Mensúavel)	Pode ser expresso de forma quantitativa.
<i>A = Attainable</i> (Atingível)	Os objetivos são razoáveis e possíveis de alcançar.
<i>R = Realistic</i> (Realista)	É diretamente proporcional às condições onde o trabalho é desenvolvido.
<i>T = Time-based</i> (Oportuna)	É mensurável, considerando um prazo razoável de conclusão dos objetivos.

A ISO 22400-1:2014 é a norma que indica que *KPI's* podem ser usados para as atividades de manutenção, dividindo as atividades em técnicas, económicas e organizacionais.

Smith & Hawkings (Smith & Hawkings, 2004), evidenciam o facto de existirem três classes de *KPI's* utilizados na gestão da manutenção, estando eles descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Classes de *KPI's* e exemplos (adaptado de (Smith & Hawkings, 2004))

Classe do KPI	Exemplos da classe
Métricas de desempenho de processo	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalho planeado/Total de trabalho realizado; • % de ordens de trabalho finalizadas no período previsto.
Métricas de desempenho de equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • OEE; • Fiabilidade; • Disponibilidade; • MTBF.
Métricas de desempenho de custo	<ul style="list-style-type: none"> • Custos de material e fontes de energia; • Custos de ações de manutenção; • Valor de reposição de equipamento.

Apesar de existirem diversos indicadores-chave de desempenho, Franciosi (Franciosi *et al.*, 2020) indica os mais comuns quando se pretende avaliar e medir o desempenho e os impactos da manutenção, sendo estes:

- Custo de manutenção;
- OEE – *Overall Equipment Effectiveness*;
- Disponibilidade;
- Qualidade da manutenção;
- MTBF – *Mean Time Between Failure*;
- MTTR – *Mean Time To Repair*;
- *Downtime* (Tempo de inatividade da máquina);
- Número de falhas;
- Acidentes de saúde e ambientais.

2.2 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção preditiva, ou manutenção baseada na condição, tem como principal foco a prevenção de falhas nos equipamentos ou sistemas, por meio do acompanhamento de diversos parâmetros de forma contínua, com isto pretende promover o aumento da

vida útil do equipamento ou sistema. Este tipo de metodologia da manutenção dá preferência à disponibilidade, na medida em que todas as medições e verificações efetuadas ocorrem com o equipamento em funcionamento, tendo a disponibilidade da máquina uma importância primordial (Kardec & Nascif, 2012).

No entanto, a manutenção preditiva é muito mais do que isto. É caracterizada também pelo aumento da produtividade, qualidade do produto e aumento da eficiência dos processos de produção e manufatura (Mobley, 2002).

De modo a caracterizar o conceito de manutenção preditiva, apresenta-se de seguida, na Tabela 7, a definição desta estratégia de manutenção pelos mais variados autores.

Tabela 7 - Caracterização do conceito Manutenção Preditiva

Autores	Definição
(NP EN 13306:2017 Manutenção Terminologia Manutenção, 2017)	- A manutenção preditiva é uma manutenção preventiva que combina ações de monitorização da condição do equipamento, testes, inspeções e ações. A monitorização pode ser calendarizada, pontual ou em contínuo.
(Teixeira <i>et al.</i> , 2020)	A manutenção preditiva é uma estratégia que considera as informações sobre a condição do equipamento para recomendar ações de manutenção adequadas.
(Gulati, 2020)	Na manutenção preditiva recolhe-se dados através da monitorização de certos parâmetros do equipamento, seja periodicamente ou continuamente, para posteriormente realizar-se a análise dos mesmos.
(Florian <i>et al.</i> , 2021)	A manutenção preditiva é uma estratégia de manutenção baseada na condição, que realiza ações de manutenção quando são necessárias, evitando ações preventivas ou falhas desnecessárias.
(Mobley, 2002)	Tal como a manutenção preventiva, a manutenção preditiva também possui diversas definições. Para alguns trabalhadores, a manutenção preditiva foca-se na monitorização da vibração de maquinaria rotativa, na tentativa de detetar falhas incipientes e prevenir falhas catastróficas. Para outros, o foco está na monitorização de imagens infravermelhas de sistemas elétricos,

motores e outros tipos de equipamentos elétricos, com o intuito de acompanhar e detetar a evolução de problemas. No entanto, todos estes trabalhadores identificam algo em comum, que é a monitorização constante do equipamento, recolhendo dados para determinar o intervalo máximo entre reparações e minimizar não só o número como também o custo de possíveis falhas.

A manutenção baseada na condição é uma filosofia ou atitude que utiliza a condição de operação de um equipamento ou sistema para otimizar na totalidade todas as operações da fábrica. Para realizar esta monitorização da condição dos equipamentos, os sensores são os dispositivos mais utilizados (Dinardo *et al.*, 2018). Após a alocação dos sensores, é possível implementar um projeto de manutenção preditiva, composto por (Paolanti *et al.*, 2018):

- Medição de grandezas físicas requeridas;
- Estimativa de parâmetros de controlo;
- Reconhecimento da condição de todo o sistema;
- Organização e planeamento de ações de manutenção antes da ocorrência de falha e/ou avaria.

Ayo-Imoru & Cilliers (Ayo-Imoru & Cilliers, 2018) apresentam as diferentes fases da manutenção preditiva, tal como representado na Figura 6.

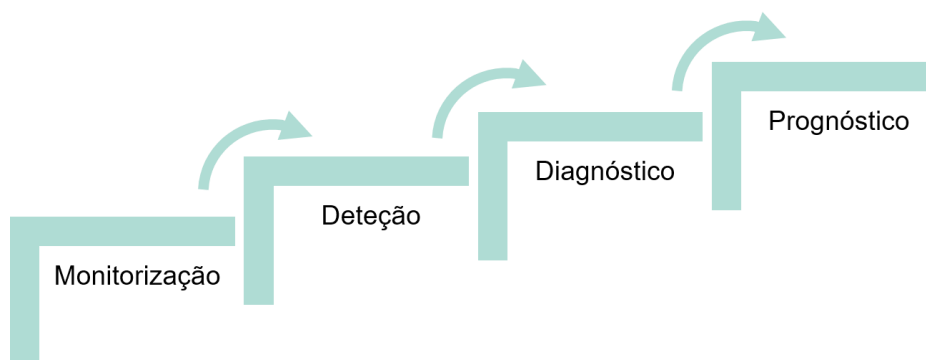


Figura 6 - Fases da manutenção preditiva (Adaptado de (Ayo-Imoru & Cilliers, 2018))

Quando a manutenção preditiva é bem estruturada é possível poupar entre 8% e 12% do seu investimento. Dependendo das condições e do negócio, as organizações conseguem rentabilizar em dez vezes mais o capital investido neste programa, sendo que os custos de manutenção são reduzidos em cerca de 25% a 30%, há ainda a redução

de 70% a 75% em ações de resolução de problemas, diminuição de *downtimes* em 35% a 45% e aumento de 20 a 25% da produção (Sahba *et al.*, 2021).

Sahba *et al.* (Sahba *et al.*, 2021) dividem o conceito de manutenção preditiva em diferentes níveis de maturidade, tal como descrito na Tabela 8.

Tabela 8 - Níveis de maturidade da manutenção preditiva (Adaptado de (Sahba *et al.*, 2021))

Níveis de maturidade	Descrição
1º Nível	Nível mais simples, em que são realizadas duas ações pelo técnico de manutenção. Uma das ações é a inspeção visual periódica e a segunda foca-se na criação de um <i>checklist</i> para descobrir a melhor fase de reparação ou substituição do componente na máquina.
2º Nível	São realizadas inspeções periódicas, fundamentadas pelo nível de conhecimento do técnico e pelo uso de instrumentos de leitura ou gravação da atual condição da máquina. Estas informações recolhidas são analisadas por profissionais que irão prever o(s) problema(s).
3º Nível	Uso de sensores que efetuam a monitorização, a recolha e posterior envio dos dados de forma contínua para uma base de dados. Por fim, os engenheiros analisam a situação e atuam consoante os dados recolhidos.

2.2.1 CONDIÇÕES PARA IMPLEMENTAR MANUTENÇÃO PREDITIVA

A decisão de implementar um programa de manutenção preditiva é o primeiro passo para controlar todos os custos de manutenção e otimizar a eficiência do processo em toda a fábrica. Posto isto, para se obter um plano de sucesso, é necessário quantificar o custo-benefício gerado pela implementação do programa (Moblely, 2002).

Autores como Kardec & Nascif (Kardec & Nascif, 2012), apontam as seguintes condições para adotar a manutenção preditiva:

- O sistema, o equipamento ou a instalação têm de permitir realizar algum tipo de monitorização;
- O sistema, o equipamento ou a instalação devem ser suficientemente rentáveis para que se justifique este tipo de manutenção, já que carece de alguns custos;

- Todas as falhas devem ser provenientes de causas que possam ser monitorizadas e assim, controlar a sua progressão;
- Há a necessidade de estabelecer um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado.

A Figura 7 apresenta os fatores para análise da adoção da política de manutenção preditiva, segundo Kardec & Nascif (Kardec & Nascif, 2012).

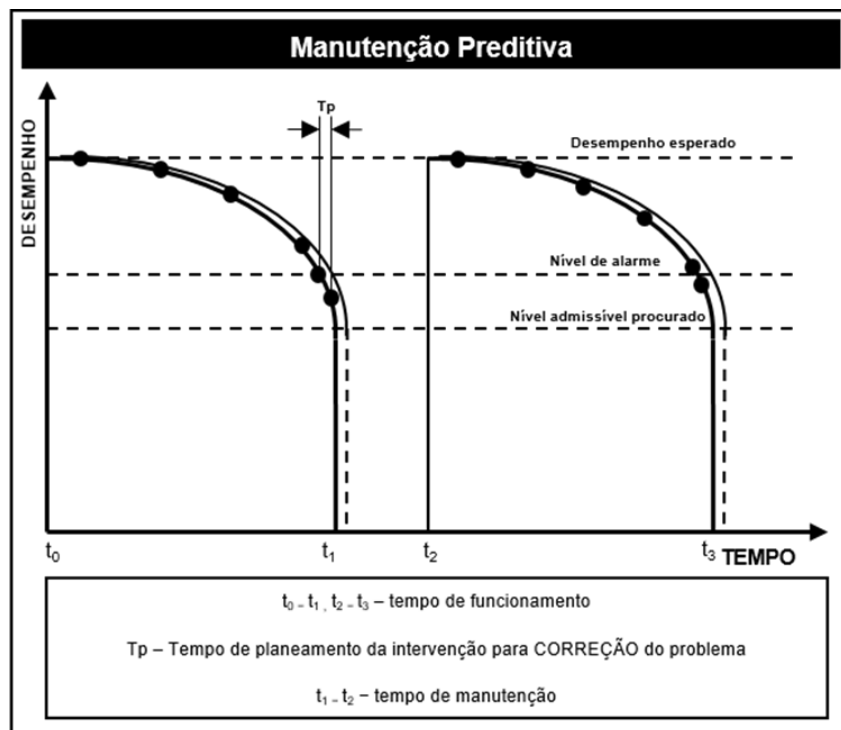


Figura 7 - Fatores de análise na adoção de política de manutenção preditiva (Kardec & Nascif, 2012)

Já Levitt (Levitt, 2003) constata que antes de se iniciar o programa de manutenção preditiva, é essencial responder às seguintes questões:

- Qual é o objetivo do programa de manutenção preditiva?
- A empresa está preparada para realizar manutenção preditiva?
- São as técnicas específicas, as técnicas adequadas?
- Este é o fornecedor adequado?
- Há alguma forma de atender a isso ao invés de adquirir equipamentos e/ou serviços?

Posteriormente, há uma etapa determinante a decidir que assenta nas metas, objetivos e benefícios da criação de um projeto de gestão de manutenção preditiva. E, de forma, a alcançar um projeto vantajoso são necessários os seguintes objetivos (Moblely, 2002):

- Eliminar a manutenção desnecessária;

- Minimizar perdas de produção provocadas por falhas;
- Reduzir peças de reparação do inventário;
- Aumentar a eficiência do processo;
- Aumentar a qualidade do produto e a capacidade de produção;
- Promover o aumento do tempo útil de vida dos sistemas;
- Reduzir os custos globais de manutenção;
- Promover o aumento dos lucros globais.

2.2.2 PRINCÍPIOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção preditiva para ser alcançada com sucesso, segue um conjunto de etapas metodológicas: Recolha e pré-tratamento de dados, construção de indicadores saudáveis, localização e detecção de anomalias, previsão e prognóstico do estado da máquina ou potenciais problemas e ações de correção, quando anomalias são detetadas no sistema (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019). Este conjunto de etapas encontra-se descrito na Tabela 9, de forma sucinta.

Tabela 9 - Etapas a seguir para alcançar a manutenção preditiva (Adaptado de (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019))

Etapas	Descrição
Recolha de dados	Carateriza-se pelo uso de diferentes medições que possam evidenciar a degradação de um componente ou sistema (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019).
Pré-tratamento de dados	Tem como desígnio extrair indicadores de falha utilizando sinais de processamento (frequência, tempo) e a inteligência artificial (sensores) (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019).
Construção de indicadores	A construção de indicadores “saudáveis” permite visualizar a evolução do desempenho de um sistema ou componente ao longo do tempo (Lei <i>et al.</i> , 2018).
Localização e detecção de anomalias	As falhas ou anomalias são tipicamente representadas pela gravação de medições que já ocorreram no passado através da análise de uma panóplia de caraterísticas que o equipamento apresenta. A detecção de anomalias, normalmente, opera sem a necessidade de ser supervisionada, o que representa algo

	muito atrativo para quem a implementa (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019).
Previsão e prognóstico	O modelo de previsão e prognóstico deve ser suficientemente preciso para se obter previsões fiáveis, o tempo entre a previsão e o momento da falha deve ser extenso para que se consiga planejar ações de manutenção e intervir antes da falha ou avaria (Ekwaro-Osire <i>et al.</i> , 2017).
Ações de correção	Quando a degradação ou falha é detetada ou prevista, as ações de correção necessitam de ser definidas e planeadas. Estas ações são definidas com o objetivo de maximizar a disponibilidade do sistema, como também de reduzir custos associados à manutenção (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019).

2.2.3 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Scheffer & Girdhar (Scheffer & Girdhar, 2004) evidenciam o facto de existirem inúmeras técnicas possíveis para aplicar na manutenção baseada na condição, como por exemplo:

- Monitorização de vibrações;
- Monitorização da temperatura;
- Análise de óleos;
- Emissão acústica;
- Análise de partículas;
- Monitorização da corrosão;
- Termografia;
- Monitorização do desempenho.

2.2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Embora a manutenção preditiva seja capaz de colmatar as desvantagens tanto da manutenção corretiva, como também da preventiva, ela tem algumas contrariedades no que toca à sua aplicação, já que apenas pode ser aplicada de forma eficaz em cerca de 20% dos modos de falha. Assim sendo, pode-se dizer que esta estratégia não é a ideal para determinadas indústrias (Bengtsson & Lundström, 2018).

Pinto (Pinto, 2013) e Pereira (Pereira, 2009) descrevem as vantagens e desvantagens da implementação da metodologia CBM, tal como representadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Vantagens e desvantagens da implementação de manutenção preditiva segundo (Pereira, 2009; Pinto, 2013)

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">• As ações de manutenção nos sistemas apenas ocorrem quando existem variações consideráveis na sua condição de funcionamento;• Há um extenso conhecimento dos defeitos antes da ocorrência;• Diminuição considerável de custos associados à não manutenção;• Acompanhamento permanente e em tempo real do equipamento.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">• Custos indiretos de manutenção mais elevados;• Maior dependência de fornecedores de equipamentos e serviços;• Aumento da burocracia associada à função manutenção.

De forma a complementar, são apontadas as vantagens e desvantagens da manutenção preditiva, segundo Mechefske (Mechefske, 2005), na Tabela 11.

Tabela 11 - Vantagens e desvantagens da implementação da manutenção preditiva segundo (Mechefske, 2005)

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">• Aumento da fiabilidade, disponibilidade e eficiência produtiva;• Diminuição de custos de manutenção e de stocks de peças de substituição;• Melhor gestão do risco;• Aumento da segurança nas instalações;• Aumento do ciclo de vida do equipamento;• Diminuição da ocorrência de falhas após reparação;• Melhoria de relações com os clientes.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">• Custos associados aos equipamentos de monitorização;• Necessidade de colaboradores especializados;• Compromisso com a gestão de topo;• Recolha de dados demorada.

2.2.5 APLICAÇÕES PRÁTICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção preditiva é aplicada globalmente, em diversas áreas da indústria, e por esse motivo, na Tabela 12 são apresentadas aplicações práticas de casos de estudo acerca da temática.

Tabela 12 - Aplicações práticas de casos de estudo acerca da manutenção preditiva

Referências bibliográficas	Descrição do caso de estudo
(Crespo Márquez <i>et al.</i> , 2020)	<p>O artigo aplica a análise preditiva, processos de <i>Big data</i> e ferramentas de criação de planos de manutenção preditiva para rolamentos de eixos de comboios, em Espanha.</p> <p>O estudo trouxe uma abordagem inovadora, já que a identificação de anomalias relacionadas à deterioração dos rolamentos é realizada através de métodos de previsão da temperatura dos rolamentos.</p> <p>Após o término do projeto, concluiu-se que a ferramenta superou as expectativas, isto é, apresentava 0,98 de coeficiente de correlação quando o necessário era apenas de 0,96 e esta é capaz de identificar rolamentos danificados com 100% de precisão.</p>
(X. Chen <i>et al.</i> , 2021)	<p>O caso de estudo procura enfrentar os desafios provenientes da aplicação de métodos baseados em dados para melhorar o desempenho dos setores e implementar modelos de manutenção preditiva na empresa <i>TATA Steel, Shotton</i>. O objetivo do projeto foca-se na previsão do comportamento de desgaste dos componentes presentes na linha de produção e assim, tomar decisões baseadas nos dados recolhidos através de diversos métodos artificiais.</p> <p>O estudo concluiu que a manutenção preditiva é</p>
(de Pater & Mitici, 2021)	<p>O caso de estudo centra-se no desenvolvimento de uma abordagem integrada para o planeamento de manutenção preditiva para sistemas de múltiplos componentes em aeronaves, componentes esses reparáveis.</p>

	<p>Os resultados do planeamento da manutenção preditiva, demonstraram que esta abordagem permite reduzir custos associados à manutenção em cerca de 48% face a uma estratégia de manutenção corretiva e de 30% em relação a uma estratégia de manutenção preventiva.</p>
(Bhat <i>et al.</i> , 2021)	<p>O caso de estudo baseia-se na aplicação do método de ferrografia em caixas de engrenagens helicoidais, de modo a detetar partículas de desgaste no óleo lubrificante.</p> <p>A aplicação deste método permitiu identificar o desempenho da máquina através dos detritos, com base na sua concentração, levando à deteção e previsão precoce de quebra de componentes.</p>
(de Benedetti <i>et al.</i> , 2018)	<p>Este caso de estudo, com duração de 731 dias, focou-se num modelo projetado para prever a produção de energia AC em sistema fotovoltaicos, realizando essa análise através da monitorização da irradiância solar.</p> <p>O relatório elaborado apresenta uma excelente taxa de deteção de anomalias, sendo esta superior a 90%. Além disso, foi possível detetar tendências de desvios do sistema face ao comportamento ideal de operação e emitir alertas de manutenção preditiva.</p>
(Luo <i>et al.</i> , 2020)	<p>Luo <i>et al.</i>, implementaram manutenção preditiva em máquinas CNC, através do uso do <i>Digital Twin</i> (DT).</p> <p>Os resultados obtidos demonstraram que o método proposto era viável e mais preciso que uma abordagem simples.</p>
(Daniyan <i>et al.</i> , 2020)	<p>O artigo menciona que foi desenvolvida uma ferramenta de diagnóstico e prognóstico para monitorizar e prever constantemente a taxa de degradação e a vida útil remanescente dos rolamentos da roda de vagões ferroviários, em MATLAB.</p> <p>Os resultados obtidos indicaram que a ferramenta era adequada para determinar a condição dos rolamentos, prever o MTTF, bem como o tempo de vida remanescente dos rolamentos.</p>

(Bravo M <i>et al.</i> , 2021)	<p>O presente estudo tem lugar na <i>Compania Energética de Occidente</i>, na Colômbia, sendo que utiliza a manutenção preditiva para identificar a distribuição de falhas nos transformadores e ocorre o desenvolvimento de aplicações que auxiliam os engenheiros na previsão de falhas.</p>
	<p>O artigo refere que as falhas foram identificadas e caracterizadas, os indicadores de fiabilidade e qualidade foram melhorados, os custos reduziram e as falhas diminuíram.</p>
(Orhan <i>et al.</i> , 2006)	<p>O seguinte estudo centra-se na análise de vibrações de uma bomba centrífuga de grandes dimensões.</p> <p>Os resultados obtidos foram excelentes, já que após três semanas a amplitude de vibração aumentou repentinamente e deu-se devido a existirem folgas nos rolamentos, o que levou os autores a tomarem ações de manutenção e planeamento de ações de manutenção futuras.</p>

2.3 MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE

A *Reliability-centered Maintenance* – Manutenção centrada na Fiabilidade pode ser descrita como um processo utilizado para determinar os requisitos de manutenção necessários de um ativo físico que esteja no contexto de operação. Em termos mais concretos, é possível evidenciar que é o método utilizado para determinar o que é necessário realizar, de modo a assegurar que qualquer ativo físico, no contexto de operação, continua a desempenhar as funções requeridas pelo utilizador (Moubray, 1997).

A manutenção centrada na fiabilidade é uma filosofia atrativa nas áreas da manutenção e da fiabilidade, sendo que se trata de forma sistemática de determinar a abordagem de manutenção, a ser usada, mais eficaz tendo em conta os diversos tipos de manutenção. Normalmente, a RCM é implementada aliada à manutenção preditiva, já que esta última monitoriza continuamente a fiabilidade do sistema e determina as ações de manutenção necessárias (Rahmati *et al.*, 2018).

A RCM é uma ferramenta de apoio à decisão de topo e a sua abordagem clássica, segundo Kardec & Nascif (Kardec & Nascif, 2012), inclui:

- Seleção do tema;
- Definição de funções e padrões de desempenho;
- Observação e definição de falhas funcionais e padrões de desempenho;
- Análise de modos e efeitos de falhas – FMEA;
- Realização do histórico de manutenção e revisão de documentação técnica;
- Determinação e realização de ações de manutenção – Política, tarefas, frequência.

A implementação da manutenção centrada na fiabilidade proporciona às organizações que a adotam, uma quantidade significativa de vantagens, as quais estão apresentadas resumidamente na Tabela 13.

Tabela 13 - Vantagens e desvantagens da implementação da manutenção centrada na fiabilidade

Vantagens	Descrição
Mais segurança e melhores condições ambientais	A RCM considera a segurança e as implicações ambientais de uma falha antes de considerar como esta afeta as operações, ou seja, são sempre tomadas medidas para minimizar possíveis ameaças à segurança e ao ambiente (Moubray, 1997).
Melhoria do desempenho operacional	A manutenção centrada na fiabilidade reconhece que todos os tipos de manutenção têm valor, e fornece algumas regras para se entender qual desses tipos é mais eficaz em cada situação (Moubray, 1997).
Maior custo-benefício da manutenção	A implementação do tipo de manutenção mais adequado, assegura que o investimento realizado na manutenção se dará onde o efeito é maior (Kardec & Nascif, 2012). Caso a metodologia RCM seja aplicada corretamente, a quantidade de tarefas de rotina são reduzidas, normalmente, em cerca de 40% a 70% (Moubray, 1997). Há também a redução de 10% a 30% de trabalhos emergenciais (Kardec & Nascif, 2012).
Aumento da vida útil dos equipamentos	A implementação da RCM, é um fator de aumento do tempo de vida útil dos equipamentos, já que há controlo da condição e atendimento a todo o processo (Moubray, 1997).
Base de dados completa	A análise realizada pela equipa de trabalho promove a recolha de uma panóplia de dados, que são armazenados na base de dados RCM da equipa de análise (Moubray, 1997).

Maior motivação

Com a criação das equipas de análise um ambiente de participação, cooperação e ajuda é criado e, posto isto, o estado de espírito das pessoas muda completamente (Kardec & Nascif, 2012).

Melhor trabalho de equipa

A manutenção centrada na fiabilidade promove a fácil compreensão de técnicas a adotar por todas as pessoas, de modo que todos realizem o que necessitam de realizar na manutenção. Com isto, é dada uma melhor compreensão a todos os elementos do grupo do que a manutenção pode alcançar (ou não) e o que é necessário para alcançar isso mesmo (Moubray, 1997).

2.3.1 PRÍNCÍPIOS DA METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE

A manutenção centrada na fiabilidade tem como principal desígnio garantir a capacidade do equipamento, de forma a desenvolver as funções desejadas, de acordo com diversos padrões especificados e procurando ter em consideração o seu próprio contexto laboral (Ramos, 2012). Ramos (Ramos, 2012) explicita os seguintes princípios na caracterização da RCM:

- A função e o contexto do equipamento, componente ou sistema são os aspetos mais importantes;
- Determinados equipamentos demonstram diversas formas de falha, desde as menos preocupantes no caso de não afetarem a função, até às mais preocupantes que podem originar uma catástrofe;
- A distinção de equipamentos de função prioritária deve ser realizada e as ações de manutenção preventivas executadas apenas a esses;
- Realizar manutenção preventiva sistemática somente em casos onde a substituição aumenta a fiabilidade do equipamento;
- A manutenção condicionada torna-se uma prioridade;
- Realizar análises de modos de falhas e de funções com o auxílio de grupos de trabalho.

2.3.2 PROCESSO DE METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE

Moubray (Moubray, 1997), indica que a utilização da manutenção centrada na fiabilidade, num bem ou sistema que está a ser analisado, necessita de responder às seguintes questões:

- Quais as funções e os padrões de desempenho requeridos associados ao ativo?

- De que formas pode falhar ao cumprir as suas funções?
- O que causa cada falha funcional?
- Qual a importância das consequências de cada falha?
- O que pode ser feito para prevenir cada falha?
- O que fazer, caso não seja encontrada uma tarefa preventiva apropriada?

De acordo com Moubray (Moubray, 1997), as ferramentas necessárias para desempenhar o processo da filosofia RCM são:

- FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis* (Análise de Modos e Efeitos das Falhas);
- *The Diagram RCM Decision Program* – Diagrama de Decisão da Metodologia RCM.

Márquez *et al.* (Márquez *et al.*, 2009) descrevem o processo de implementação da filosofia RCM, de forma ilustrada, como representado na Figura 8.

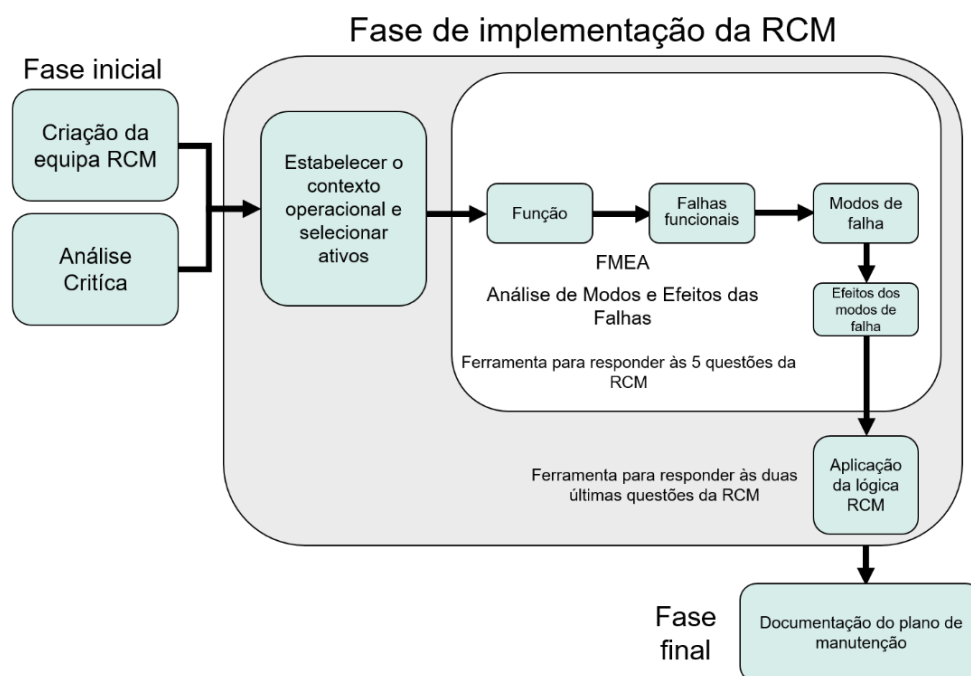


Figura 8 - Processo de implementação da filosofia RCM (Adaptado de (Márquez *et al.*, 2009))

2.3.3 ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DAS FALHAS

O FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis* (Análise de Modos e Efeitos de Falhas) é um método amplamente utilizado e reconhecido na indústria para determinar preventivamente as condições defeituosas nos componentes, peças ou bens de

investimentos maiores. Esta análise é frequentemente usada durante as fases de projeto e desenvolvimento e tem como objetivo prevenir erros e falhas já durante a fase de desenvolvimento, assim é um método capaz de aumentar os níveis de fiabilidade de componentes ou até de sistemas (Filz *et al.*, 2021).

De forma, a realizar uma análise de modos e efeitos de falhas algumas etapas têm de ser seguidas.

Inicialmente, há a necessidade de elaborar uma análise estrutural do sistema para determinar o foco da FMEA (Filz *et al.*, 2021).

Em seguida, é de realçar que a FMEA não pode ser realizada apenas por uma pessoa, então é necessário formar uma equipa multifuncional, construída por especialistas em diversas áreas (Filz *et al.*, 2021).

Após a função do sistema estar caracterizada, vários possíveis modos de falha são determinados. Com base nesses resultados, o risco de cada modo de falha deve ser calculado, tendo em conta os fatores da Equação 1 (Filz *et al.*, 2021).

$$RPN = Ocorrência \times Severidade \times Detecção$$

Equação 1

Por fim, o valor de RPN facilita a identificação dos maiores riscos e ajuda na tomada de decisão. Os modos de falha devem ser priorizados com base nos maiores valores de RPN, especialmente em atividades de alto risco, e assim agir de forma a melhorar o desempenho do sistema. As ações a tomar podem ser divididas em três categorias: eliminar modos de falha, aumentar a deteção de falhas ou minimizar perdas em caso de ocorrência de falha (Liu, 2016).

2.3.4 APLICAÇÕES PRÁTICAS DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA FIABILIDADE

Na Tabela 14 são expostos e descritos alguns casos de estudo baseados na implementação da manutenção centrada na fiabilidade.

Tabela 14 - Aplicações práticas de casos de estudo acerca da manutenção centrada na fiabilidade

Referências Bibliográficas	Descrição do caso de estudo
----------------------------	-----------------------------

-
- (Yavuz *et al.*, 2019)
- Este caso de estudo consiste na aplicação da manutenção centrada na fiabilidade na indústria alimentar, em máquinas de embalamento.
- Inicialmente, foi constatado que os diversos *KPI's* utilizados anteriormente, não eram suficientes para prevenir falhas e, posto isto, o caso de estudo seguiu a filosofia de manutenção centrada na fiabilidade para anular todas as falhas e avarias.
- O processo de implementação foi um sucesso, já que de maio a junho, o OEE subiu cerca de 4,5% e em outubro, o OEE estava 45 superior ao calculado em maio.
-
- (Fuentes-Huerta *et al.*, 2021)
- A indústria automóvel usa a manutenção centrada na fiabilidade para estabelecer planos eficientes e menos dispendiosos de manutenção.
- Este caso de estudo foca-se na implementação deste tipo de manutenção, no entanto numa situação específica, isto é, a abordagem é utilizada para casos em que existem bastantes dados censurados. Assim sendo, houve a necessidade de contar com a informação e conhecimentos fornecidos pelos técnicos de manutenção para formular a estratégia.
- Por fim, a implementação permitiu gerar excelentes resultados financeiramente, reduzindo os custos de manutenção em 40%.
-
- (Enjavimadar & Rastegar, 2022)
- O caso de estudo deu-se numa empresa de sistemas de distribuição de energia.
- A aplicação da RCM foi realizada através da criação de diversos cenários, cenários esses de investigação de impactos da duração das ações de manutenção.
- Por fim, deu-se a redução de 7% em custos de manutenção nos transformadores, cabos, *switches*, fusíveis, isoladores, entre outros componentes elétricos.
-
- (Zakikhani *et al.*, 2020)
- Este caso de estudo foca-se na área dos gasodutos nos EUA, já que a corrosão externa dos mesmos levou a 1700 falhas nas últimas décadas, levando a um prejuízo de cerca de 189 milhões de dólares.
- Houve ma maior preocupação em considerar a disponibilidade, ao invés da maioria dos métodos que só se centra em custos,
-

fiabilidade e níveis de condição e, para isso, realizaram diversas simulações em *Monte Carlo*.

Por fim, concluiu-se que as ações de manutenção devem-se dar após 30,1 anos e 40,5 anos, de forma a se obter uma manutenção mais eficaz.

(Sarazin *et al.*,
2021)

Neste artigo foi criada uma solução de ES para a manutenção baseada na condição em sistemas aeronáuticos, em França.

O estudo passa por criar uma rede de informação heterogénea para abordar os fatores de eficiência e aplicabilidade deste sistema moderno, realizando a deteção de anomalias e criando diagnósticos.

(Carretero *et al.*,
2003)

Em 2000, a UE fundou um programa apelidado por 'RAIL: *Reliability centered maintenance approach for the infrastructure and logistics of railway operation*' com a intenção de aplicar técnicas de RCM nas infraestruturas ferroviárias.

Quando o programa foi finalizado concluiu-se que as técnicas de RCM utilizadas foram muito promissoras já que se promove o aumento da vida útil do equipamento e conseqüentemente, a redução de custos de manutenção corretiva. A produção também aumentou, os valores envolvidos na compra de componentes e materiais reduziu, deu-se o aumento do registo atualizado de relatórios de inventário e maior conhecimento dos sistemas par auxiliar a empresa a escolher os equipamentos com o melhor LCC.

Devido ao sucesso do programa, uma empresa espanhola de linhas ferroviárias (*RENFE*) e uma empresa alemã (*DB A.G.*), também de linhas ferroviárias, não só decidiram adotar o programa de RCM como também iniciaram a implementação da TPM.

(Yssaad *et al.*,
2014)

Este trabalho consiste na implementação de manutenção centrada na fiabilidade numa indústria argelina de sistemas de energia.

O trabalho deu-se de forma imersiva com a ferramenta FMECA, no período de 120 meses, acompanhando intensivamente parâmetros como, por exemplo, fiabilidade, custos, MTBF, MTTR, entre outros.

	<p>Os resultados obtidos descreveram que ocorreu o aumento do MTBF (ano) de 3,33 para 19,6, o MTTR (h/ano) aumentou de 3,33 para 4,9 e a disponibilidade aumentou.</p>
(Melani <i>et al.</i> , 2018)	<p>O desenvolvimento deste caso de estudo deu-se numa central de geração de energia elétrica a carvão, em São Paulo, no Brasil.</p> <p>O estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um método, baseado na RCM, que identifica os componentes mais críticos de um sistema, de forma a contribuir para a priorização de ações de manutenção no sistema de dessulfurização de gases de combustão.</p> <p>Os resultados obtidos indicam que o modelo é fiável, já que identificam os componentes mais críticos para os quais os responsáveis da manutenção devem focar a atenção, visando aumentar a disponibilidade e diminuir o risco.</p>
(Lee & Choi, 2020)	<p>O presente estudo tem como objetivo avaliar a fiabilidade de um gerador de arranque de aviões, na República da Coreia. Ao utilizar a manutenção centrada na fiabilidade para tomar decisões foi possível satisfazer o requisito fiabilidade, reduzir a carga de manutenção e identificar que a vida útil do gerador depende da fiabilidade do rolamento.</p>
(Villarini <i>et al.</i> , 2017)	<p>Este caso de estudo incidiu no setor dos painéis fotovoltaicos, em Itália, com recurso à manutenção centrada na fiabilidade e à análise FMEA. Posto isto, foram analisados e avaliados diversos dados históricos de ações de manutenção da empresa, deu-se a otimização da eficiência dos sistemas, o RPN reduziu e consequentemente, todo o plano de manutenção foi revisto e adaptado.</p>

2.4 INDÚSTRIA 4.0 E SENSORIZAÇÃO

A necessidade de adaptação e da utilização de novas tecnologias despertou uma nova era da indústria, a indústria 4.0. O termo nasce de uma era industrial que promove a introdução de novos dispositivos, a conectividade, a quantidade de dados, a redução de inventário, a customização e o controlo da produção (Zonta *et al.*, 2020).

Os dados são o elemento determinante nesta era da informação, já que através deles é possível antecipar ou colaborar na tomada de decisões preditivas. A manutenção preditiva remete par ao histórico nas bases de dados, novos modelos e para o domínio de conhecimento. Ao adotar esta vertente da manutenção consegue-se visualizar tendências, correlações estatísticas, padrões de comportamento ou até utilizar modelos de *machine learning*, de modo a antecipar falhas e a melhorar o processo da tomada de decisão das ações de manutenção que evitem o *downtime* (Zonta *et al.*, 2020).

O *Boston consulting group* – grupo de consultoria de *Boston* (BCG) divide esta nova revolução industrial em nove tendências na tecnologia para transformar todas as atividades produtivas, sendo elas (Piccarozzi *et al.*, 2021):

- *Big Data Analytics* (Análise de Big Data);
- *Autonomous Robots* (Robôs Autônomos);
- *Simulation* (Simulação);
- *Horizontal and Vertical System Integration* (Integração de Sistemas Horizontalmente e Verticalmente);
- *Industrial Internet of Things* (Internet Industrial das Coisas);
- *Cybersecurity* (Cibersegurança);
- *The Cloud* (A Nuvem);
- *Additive Manufacturing* (Manufatura Aditiva);
- *Augmented Reality* (Realidade Aumentada).

Posto isto, a indústria 4.0, a grande quantidade de dados, a manutenção preditiva e a sensorização interligam-se de diversas formas, já que o sensor aliado à indústria 4.0 permite recolher os diversos dados necessários para a implementação da manutenção preditiva.

O sensor é um dispositivo que deteta estímulos de entrada, estes podem ser em qualquer quantidade, propriedade ou condição do meio físico, e com isto responde a um sinal digital. Este estímulo de entrada pode ser, por exemplo, pressão, calor, uma força, movimento, luz, um fluxo, humidade ou qualquer outro tipo de fenómeno que ocorra no meio físico. Após esta entrada, existe uma resposta, resposta essa que normalmente se manifesta em forma de sinal elétrico como por exemplo, uma frequência, voltagem, resistência, capacitância, corrente, entre outras. Este sinal elétrico é convertido, normalmente, para um ecrã ou transmitido de forma eletrónica através de uma rede própria para leitura (Huang *et al.*, 2021; Qian *et al.*, 2021).

Na Figura 9 está representado o esquema básico de um sensor.

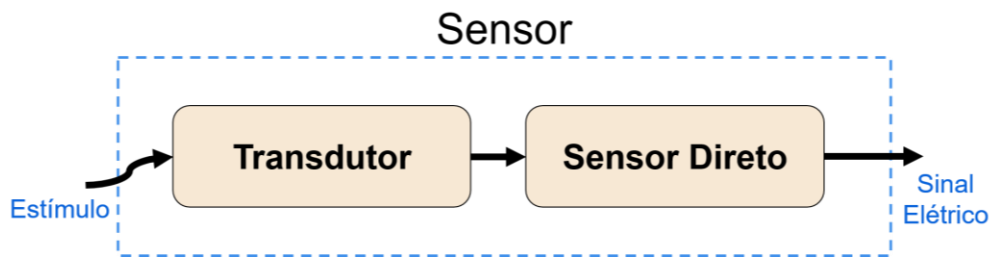


Figura 9 - Esquema básico de um sensor (Adaptado de (Javaid *et al.*, 2021))

2.4.1 RECOLHA DE DADOS

Os sensores estão preparados para o que possa ser detetado, como é o caso da pressão, temperatura, fumo, gás, fluxos, proximidade, forças, entre outros. Dependendo do tipo de sensor, o sinal elétrico de saída pode ser de diversos tipos. A classificação de cada sensor faz-se consoante os fatores a medir, campos de aplicação, considerações termodinâmicas, etc (Javaid *et al.*, 2021).

De seguida, apresentam-se alguns sensores quanto ao tipo e à sua aplicação na indústria, na Tabela 15.

Tabela 15 - Tipos de sensores e as respetivas aplicações na indústria (Adaptado de (Javaid *et al.*, 2021))

Tipos de sensores	Descrição e aplicação na indústria
Sensores de vibração	Os sensores de vibração realizam a análise de características dos equipamentos, isto é, analisam o estado e a condição da máquina e enviam sinais de acordo com os seus danos e a sua degradação.
Sensores acústicos	Os sensores acústicos ou de som são frequentemente utilizados na manutenção baseada na condição, pois têm uma forte relação com a técnica de monitorização da condição.
Sensores de temperatura	São dispositivos eletrónicos que detetam parâmetros térmicos presentes no meio que se encontram e convertem os dados de entrada em dados eletrónicos para registar as mudanças de temperatura. A aplicação destes dá-se

essencialmente no setor automóvel, meteorologia e no ramo da aviação.

Sensores de humidade

Medem a quantidade de água presente no ambiente que os rodeia e convertem essas medições em sinais que podem ser utilizados como estímulos de entrada. São normalmente utilizados na meteorologia, nos automóveis, na saúde e nas indústrias produtivas.

2.4.2 APLICAÇÃO DE SENSORES NA INDÚSTRIA 4.0

Os sensores são utilizados na recolha de dados acerca do meio físico que se encontram através de transdutores. Estes recolhem informação e fazem uso do poder computacional para efetuarem ajustes e otimizar operações presentes, consoante o tipo de dados recolhidos. Na indústria 4.0, todos os dados são enviados para uma base de dados, já que os sensores inteligentes têm uma memória reduzida (Javaid *et al.*, 2021).

A implementação de sensores cada vez se torna mais comum e versátil, isto é, a aplicação é frequentemente realizada em indústrias produtivas, no entanto já são utilizados até na área da saúde (Javaid *et al.*, 2021).

Em seguida, são apresentadas algumas das aplicações dos sensores inteligentes (Javaid *et al.*, 2021):

- Detetar falhas;
- Transferir informação;
- Identificar a causa-raiz das falhas durante o processo produtivo;
- Acompanhamento total do processo e produção;
- Melhorar o desempenho da produção;
- Gerir a qualidade;
- Promover a precisão das máquinas rotativas;
- Regular os processos.

2.4.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

A análise de vibrações é utilizada para determinar as condições de operação e condições mecânicas do equipamento. A maior vantagem é que a análise de vibrações pode identificar anomalias que se estão a desenvolver antes de se tornarem em problemas que possam comprometer o equipamento e até originar paragens não programadas. Posto isto, é necessário monitorizar de forma regular as vibrações da máquina, tanto em regime contínuo como em intervalos programados (Scheffer & Girdhar, 2004).

O deslocamento, a velocidade e a aceleração são características da vibração que são medidas para determinar a severidade da vibração, ou seja, saber a amplitude. A operacionalidade da máquina relaciona-se à amplitude. Estes indicadores indicam o nível de condição da máquina e normalmente, observa-se que amplitudes elevadas correspondem a altos níveis de defeitos (Scheffer & Girdhar, 2004).

A Figura 10 corresponde à relação estabelecida entre estes parâmetros (Scheffer & Girdhar, 2004).

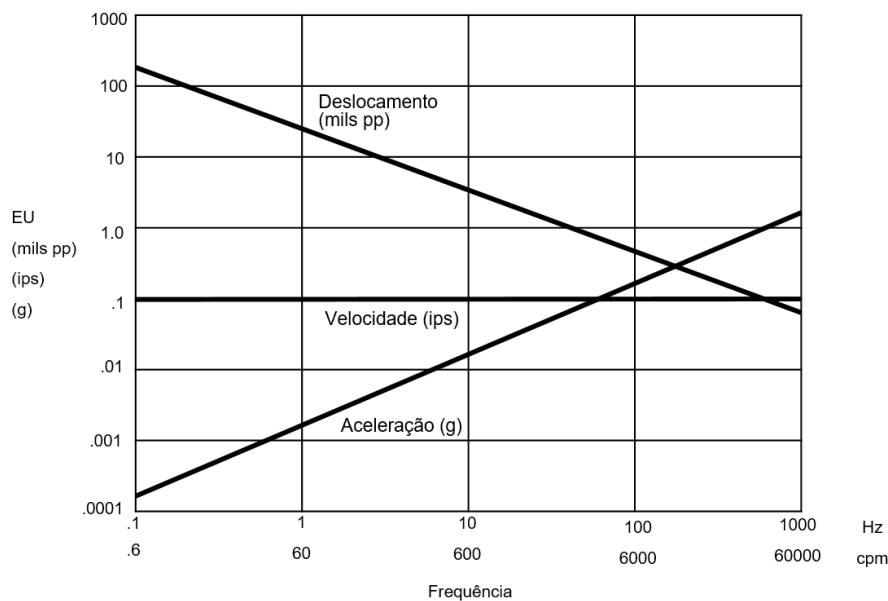


Figura 10 - Relação entre deslocamento, velocidade e aceleração (Adaptado de (Scheffer & Girdhar, 2004))

Posto isto, Scheffer & Girdhar (Scheffer & Girdhar, 2004) dividem as faixas de frequência em três categorias, tal como representado na Tabela 16.

Tabela 16 - Faixas de frequência e breve descrição (Scheffer & Girdhar, 2004)

Faixas de frequência	Descrição
Menor que 10 Hz	Quanto à aceleração, são produzidas amplitudes de vibração muito pequenas, na velocidade amplitudes moderadas e amplitudes relativamente altas em termos do deslocamento.
Entre 10 Hz e 1000 Hz	Nesta situação a velocidade dá uma boa indicação da severidade de vibração.

Superior a 1000 Hz Sendo superior a 1000 Hz só a aceleração é um bom indicador.

Os transdutores têm diferentes configurações e estão divididos em três tipos:

- Transdutores de deslocamento sem contacto – frequências abaixo de 10 Hz;
- Transdutores de velocidade – Faixas de frequência entre 10 Hz e 1500 Hz;
- Transdutores de aceleração ou acelerómetros – indicados para faixas de frequência superiores a 1000 Hz.

Os acelerómetros são os transdutores mais aplicados em máquinas rotativas, são compactos, bastante leves, têm uma ampla faixa de amplitude de resposta e o seu funcionamento é baseado na terceira lei de *Newton*. São, normalmente, aplicados para monitorizar a condição, por exemplo, em rolamentos ou engrenagens que produzem vibrações com altas frequências (Scheffer & Girdhar, 2004).

Como se pretende a melhor recolha de dados possível, há que realçar a importância de definir a melhor localização dos sensores, no equipamento que se pretende averiguar.

A instalação de acelerómetros requer uma montagem rígida (Mechefske, 2005). E existem três tipos de montagem mais aconselhadas pelos autores, descritas e explicadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Tipos de montagem de acelerómetros

Tipo de montagem	Descrição
Montagem com pinos ou parafusos	<p>A montagem permanente com pinos ou parafusos é normalmente a melhor para maquinaria de altos níveis de velocidade em que é necessária a medição de valores de frequência altos (Mechefske, 2005). Este método permite a melhor medição da vibração por parte do transdutor e deve ser usada sempre que possível (Scheffer & Girdhar, 2004).</p> <p>A montagem com pinos tem de ser realizada numa superfície plana para assim se obter a melhor amplitude e frequência de resposta (Mechefske, 2005).</p>
Montagem magnética	<p>A montagem magnética é vantajosa quando é necessário mover e fornecer boa repetibilidade em frequências baixas, no entanto tem dificuldades em frequências altas (4 a 5 kHz) (Mechefske, 2005). É também utilizada em casos temporários de medição,</p>

logo não é aconselhável no caso de se pretender monitorizar algo permanentemente (Scheffer & Girdhar, 2004).

Montagem com fita adesiva ou cola

Esta vertente de montagem garante uma boa fixação em máquinas menos vibratórias. No entanto, quando o sensor de aceleração possui cola dá-se a redução de contacto com a superfície. A remoção ou a substituição do acelerómetro é mais difícil do que nos outros métodos, e é de extrema importância aplicar o sensor numa superfície bastante limpa (Scheffer & Girdhar, 2004).

A Figura 11 estabelece a relação entre a resposta do acelerómetro com os diferentes métodos de montagem referenciados na Tabela 17.

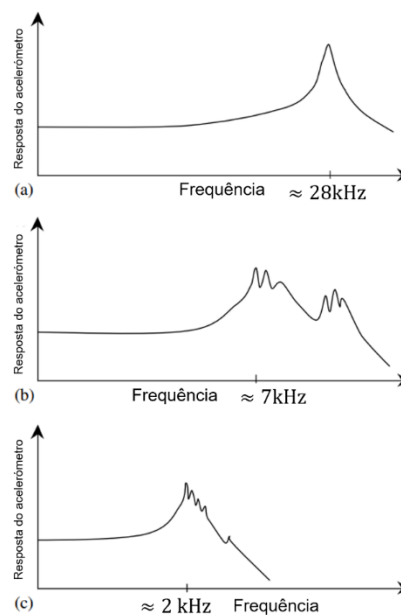


Figura 11 - Resposta do acelerómetro vs frequência nos diversos tipos de montagem (a – com pinos; b – magnética; c – não permanente) (Adaptado de (Scheffer & Girdhar, 2004))

DESENVOLVIMENTO

3.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA E DOS PROCESSOS PRODUTIVOS

3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.3 ANÁLISE DE CONDIÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

3.4 ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS

3.5 PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

3.6 PLANOS DE AÇÃO

3.7 DEFINIÇÃO DOS VALORES-LIMITE OPERACIONAIS

3.8 DEFINIÇÃO DOS INDICADORES-CHAVE DE DESEMPENHO

3 DESENVOLVIMENTO

O capítulo do Desenvolvimento tem como propósito apresentar a empresa de acolhimento, expor e clarificar todo o projeto desenvolvido ao nível da implementação preditiva nas bombas de vácuo de anel líquido pertencentes às máquinas de *Grinding & Mount*, no setor do *WaferPrep*.

3.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA E DOS PROCESSOS PRODUTIVOS

A ATEP – *Amkor Technology Portugal, S.A.* é uma empresa que atua na área da indústria dos semicondutores na vertente OSAT, situada na Avenida Primeiro de Maio nº 801, em Vila do Conde.

No ano de 1996, deu-se o início da empresa com a designação de *Siemens Semiconductor Portugal*, pertencente ao grupo multinacional *Siemens Semiconductor AG*.

A Figura 12 apresenta um resumo sucinto da ATEP e a visão global desta multinacional.



Figura 12 - Resumo da ATEP e de todo o grupo multinacional

Porém, em 1999, após a ocorrência de um processo de reestruturação e divisão no grupo *Siemens Semiconductor AG*, foi criada uma empresa independente intitulada de *Infineon Technologies AG*.

Em 2006, a *Infineon Technologies AG* aprova a divisão de memórias e cria-se a *Qimonda Portugal S.A.*, pertencente à *Qimonda AG*.

No entanto, em 2010, é decretada insolvência da *Qimonda AG* e posteriormente é aprovado um plano de reestruturação para a *Qimonda Portugal*, dando-se o início da *NANIUM S.A.*.

Por fim, no ano de 2018, a empresa *NANIUM S.A.* é totalmente adquirida por um dos maiores grupos multinacionais no setor dos semicondutores, a *Amkor Technology Inc.*, que detinha a tecnologia *Fan-Out (WLFO)* e *Wafer Level System in Package (WLSiP)*. E posto isto, passa-se a designar como *ATEP – Amkor Technology Portugal, S.A.*.

A Figura 13 apresenta resumidamente as transições a que esteve sujeita a empresa e a gama de produtos produzidos ao longo dos anos.

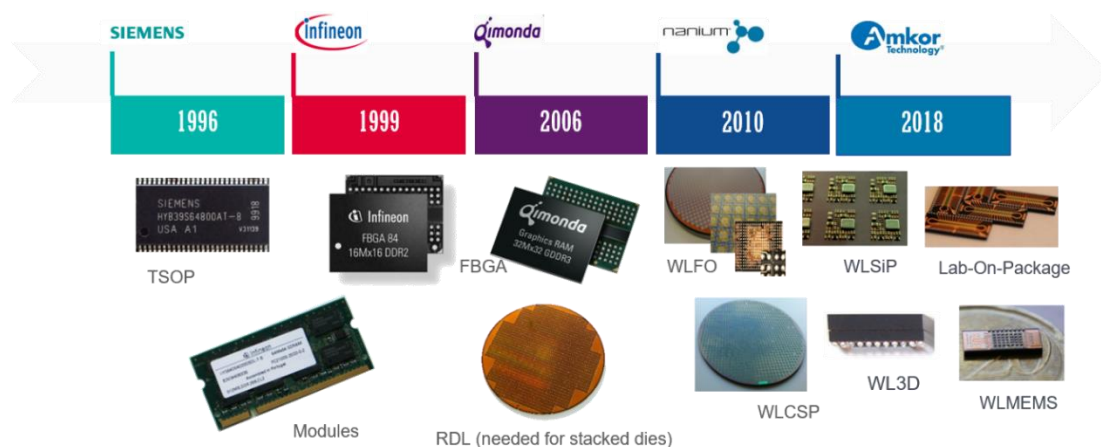


Figura 13 - Resumo da história da empresa e produtos comercializados ao longo dos anos

3.1.1 PRODUTOS E SERVIÇOS DA EMPRESA

A ATEP é uma empresa especializada na área de produção de *microchips* de memórias ultrarrápidas para serem utilizadas em produtos de elevado desempenho, tais como *smartphones*, *pc's*, *tablets* e *laptops* de última geração. No entanto, também produz uma vasta gama de produtos, baseados em semicondutores, para aplicação no setor da indústria automóvel, nas telecomunicações, em infraestruturas, na indústria aeronáutica, no setor da saúde, entre outras aplicações de consumo.

A Figura 14 descreve, qualifica e quantifica os diversos produtos produzidos pela ATEP.

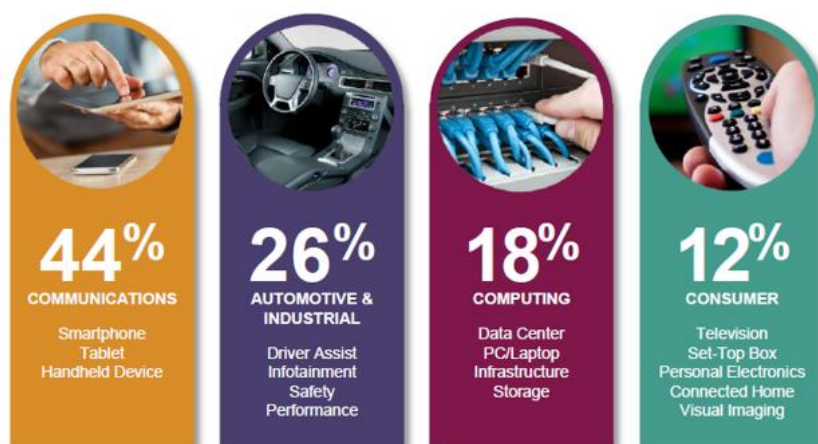


Figura 14 - Produtos comercializados pela Amkor Technology Portugal, S.A.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A monitorização da condição dos equipamentos é um pilar importantíssimo da manutenção preditiva, sendo que este tipo de acompanhamento das máquinas proporciona não só o aumento da disponibilidade dos equipamentos, o aumento da produtividade, a melhor qualidade de produto, como também a otimização da eficiência dos processos de produção e manufatura.

As máquinas de *Grinding & Mount* estão totalmente dependentes das bombas de vácuo de anel líquido fabricadas pela empresa *Kashiyama Industries, LTD.*, porém estas sofrem diversas falhas e avarias. Essas complicações devem-se essencialmente ao elevado nível de oxidação a que estão expostos os componentes e à presença de partículas de silício que se instalam no interior do equipamento e que afetam, por exemplo, o rotor, as lâminas do rotor, os rolamentos, as palhetas, o veio, os vedantes e até mesmo o interior da bomba.

O processo de *Grinding & Mount* necessita de vácuo para existir o transporte das *wafers* de silício para as diversas zonas da máquina e ainda para posicionar corretamente as *wafers* de modo a serem trabalhadas nas mesas de trabalho. Quando o vácuo falha estas podem cair, escorregar e com isto, ficarem danificadas.

Por esse motivo, a implementação de sistemas de monitorização da condição nestes equipamentos são fundamentais para prever potenciais falhas, agir antecipadamente, evitar danos no produto final e reduzir custos associados à sua aquisição e manutenção.

Na fase inicial do projeto, as bombas de vácuo não possuíam nenhum plano de manutenção agregado, ou seja, a única manutenção existente era a corretiva. Dado que

a manutenção corretiva traz inúmeras desvantagens, tanto para o equipamento, como para o processo, havia a necessidade de formular planos capazes de combater os custos elevados associados à paragem da máquina, ao dano provocado no produto final e os custos associados à aquisição de equipamentos novos. Posto isto, iniciou-se uma análise de condições do equipamento e da empresa para saber se a manutenção preditiva teria um efeito positivo, realizou-se uma análise de modos e efeitos das falhas do equipamento e começou-se a construir um plano de manutenção preventiva adequado.

Em seguida, na segunda fase de projeto, foi decidido que se optaria por utilizar componentes *Arduino* de baixo custo para começar o processo de experimentação da manutenção preditiva. Assim sendo, a escolha de componentes e a programação destes foi realizada, implementando na primeira bomba de vácuo em meados do mês de outubro. Ainda nesta fase foi decidido que métodos utilizar no tratamento das variáveis de entrada recolhidas.

Na terceira fase, surgiu a ideia de utilizar sensores de maior custo, mais capazes e com maior fiabilidade. Posto isto, os sensores foram adquiridos, a programação foi realizada e a implementação iniciou-se no mês de dezembro.

Por fim, foi realizada uma análise acerca da melhoria dos indicadores-chave de desempenho e análises de poupanças monetárias com as implementações.

A Figura 15 contém um esquema que descreve todo o processo de implementação de manutenção preditiva.

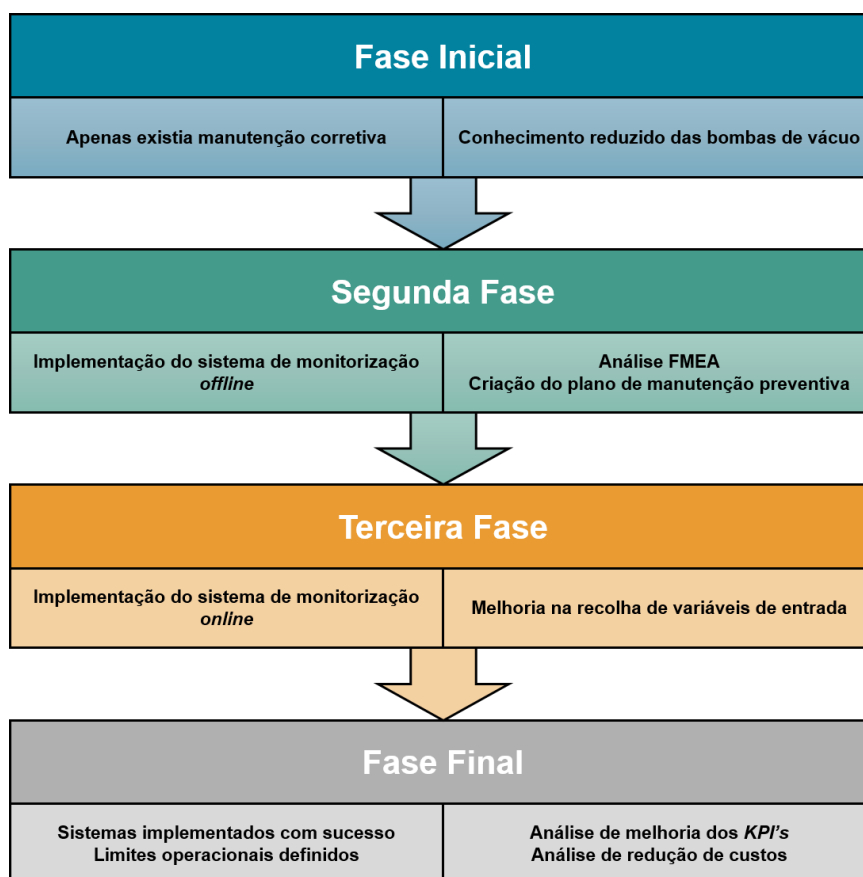


Figura 15 – Resumo do processo de implementação de manutenção preditiva

3.2.1 DESCRIÇÃO DAS BOMBAS DE VÁCUO DE ANEL LÍQUIDO

As bombas de vácuo de anel líquido ou LRVP são os equipamentos mais utilizados na indústria para produzir vácuo. Estas operam de acordo com o princípio de deslocamento positivo, com o veio e o rotor a serem as únicas peças que movem e o líquido (normalmente, água) funciona como um pistão (World Pumps, 2020).

De acordo com World Pumps (World Pumps, 2020), antes de iniciar a bomba de vácuo, o líquido enche uma parte do volume do cilindro. Quando o rotor inicia a rotação, este projeta a água através da força centrífuga para formar um anel líquido concêntrico na periferia da carcaça para realizar o trabalho de compressão. A cada rotação, dá-se a sucção de gases pela porta de entrada, a posterior compressão dos mesmos e por fim, são expulsos pela porta de descarga. Devido ao elevado número de lâminas, a operação é contínua e a descarga é não-pulsante. O líquido de trabalho é separado do gás no separador e arrefecido para posterior utilização. O anel líquido formado possui as duas funções importantes seguintes:

- Absorve o calor gerado pela compressão e condensação do vapor;
- Absorve e limpa contaminantes do processo que fiquem retidos no gás. O fornecimento contínuo de líquido de trabalho é essencial para limitar o aumento da temperatura na bomba de vácuo e qualquer excesso de aumento de temperatura irá criar defeitos no seu funcionamento.

A Figura 16 apresenta o esquema de funcionamento das bombas de vácuo de anel líquido e indica alguns dos seus componentes.

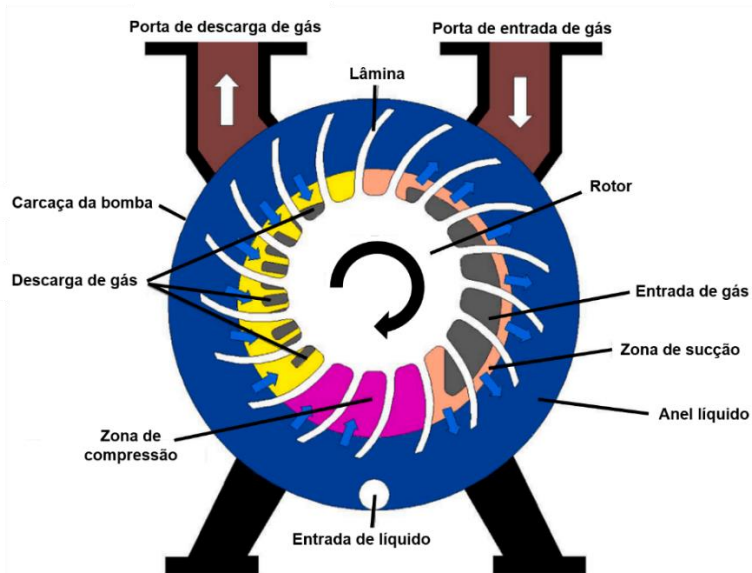


Figura 16 - Esquema de funcionamento das bombas de vácuo de anel líquido (Adaptado de (Zhang *et al.*, 2021))

3.2.2 COMPLICAÇÕES COMUNS NAS BOMBAS DE VÁCUO DE ANEL LÍQUIDO

Como já foi referido no subcapítulo 3.2.1, as bombas de vácuo de anel líquido são críticas devido ao elevado nível de oxidação dos componentes e à presença de pequenas partículas de silício que se tornam destrutivas para todos os componentes. No entanto, é necessário justificar que a elevada oxidação dos componentes ocorre devido às seguintes condições:

- Presença de detritos de silício;
- Fluido de trabalho;
- Cavitação;
- Elevada temperatura do fluido de trabalho;
- O equipamento atinge constantemente a pressão de vapor saturado.

De seguida são apresentadas imagens que ilustram o estado de degradação de diferentes componentes. Inicialmente, na Figura 17 e na Figura 18 encontra-se representado o estado de oxidação presente no interior da bomba de vácuo.



Figura 17 - Detritos metálicos provenientes do interior da bomba



Figura 18 - Detritos metálicos e oxidação do interior da bomba

Em seguida, a Figura 19 e a Figura 20 demonstram o desgaste e a oxidação dos rolamentos presentes no equipamento.



Figura 19 - Má condição dos rolamentos



Figura 20 - Rolamento oxidado

Posteriormente, a Figura 21 e a Figura 22 contêm um exemplo do rotor do equipamento quebrado.



Figura 21 - Rotor danificado



Figura 22 - Lâmina do rotor quebrada

Seguidamente, na Figura 23 apresentam-se os vedantes com perda de forma e na Figura 24 a presença de oxidação nestes componentes.



Figura 23 - Vedantes com perda de forma



Figura 24 - Vedante com presença de oxidação

Por fim, as palhetas das bombas de vácuo estão expostas a condições exigentes que danificam o material continuamente. A Figura 25 apresenta as palhetas em bom estado e a Figura 26 as palhetas degradadas.



Figura 25 - Palhetas novas



Figura 26 - Palhetas em mau estado

3.2.3 TIPOS DE AVARIAS E AS RESPATIVAS CAUSAS

As principais formas de avaria identificadas nas bombas de vácuo de anel líquido podem ser divididas por três fases de funcionamento do equipamento, sendo elas:

- Ocorrência de avaria imediatamente a seguir ao arranque da bomba de vácuo;
- Ocorrência de avaria no período operacional;
- Espontaneamente, a ocorrência de avaria denota-se dado que a bomba não arranca.

Através de uma análise foi possível perceber que os sintomas acusados pela bomba variam de acordo com a fase operacional em que esta se encontra. A Tabela 18 estabelece interligações entre esses sintomas e a fase operacional do equipamento.

Tabela 18 - Interligação entre a fase operacional do equipamento e o modo de falha

Fase Operacional	Sintoma
Imediatamente a seguir ao arranque da bomba	<ul style="list-style-type: none"> • Não produz vácuo; • Vácuo e velocidade de escape insuficientes; • Motor em sobrecarga.
Durante o período operacional	<ul style="list-style-type: none"> • Sobreaquecimento do motor; • Cavitação; • Ruído ou vibração não derivados da cavitação.
Antes de arrancar	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba de vácuo não arranca.

3.3 ANÁLISE DE CONDIÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

A etapa de análise de condições para posterior implementação de manutenção preditiva é fundamental na decisão final acerca da aplicabilidade desta filosofia a uma dada organização, sendo a fase respeitante ao levantamento de questões da metodologia *Action Research*.

De acordo com o descrito no subcapítulo 2.2.4, é notório que este tipo de metodologia da manutenção apresenta mais vantagens do que desvantagens, porém é de primordial importância o cumprimento de certas condições associadas a esta filosofia, bem como a resposta prévia a inúmeras questões propostas pelos mais conceituados autores na área, para ser perceptível o nível de viabilidade da implementação do programa de manutenção preditiva.

As questões e condições propostas pelos autores foram descritas no capítulo 2.2.1 e respondidas antes do início da execução do projeto. Na Tabela 19 são analisadas as condições propostas pelos autores.

Tabela 19 - Análise das condições de implementação de manutenção preditiva

Condições	Análise da condição
O equipamento tem de permitir realizar algum tipo de monitorização	A implementação de sensores na carcaça do equipamento é de extrema facilidade, já que o corpo é metálico permitindo assim, montagens magnéticas.
O equipamento deverá ser suficientemente rentável para que se justifique este tipo de manutenção, já que carece de alguns custos	O equipamento é bastante rentável, visto que é responsável por uma das fases mais importantes de todo o processo. Em termos monetários, o custo de aquisição de um equipamento destes, ronda os 8000 € e por esse motivo, a aplicação de sensores de elevado custo permitem obter rentabilidade.
Todas as falhas devem ser provenientes de causas que possam ser monitorizadas e	Normalmente, as falhas são provenientes do desgaste, degradação ou até de danos que ocorrem nos componentes constituintes da

assim, controlar a sua progressão	bomba, nomeadamente no rotor, nos rolamentos e no veio.
É necessário estabelecer um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado	<p>Definiu-se que seriam elaborados dois programas de acompanhamento, análise e diagnóstico, sendo eles:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema <i>offline</i>, com recurso a sensores de baixo custo; • Sistema <i>online</i>, com recurso a sensores mais dispendiosos.

Na Tabela 20 encontram-se respondidas as questões propostas pelos autores.

Tabela 20 - Análise e resposta às questões propostas por alguns dos autores mais conceituados na área da manutenção preditiva

Questões	Respostas
Qual é o objetivo do programa de manutenção preditiva?	<p>Os objetivos são os seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Garantir a qualidade do produto final; • Não danificar o produto final; • Reduzir custos de aquisição das bombas de vácuo; • Reduzir custos associados à manutenção; • Aumentar a disponibilidade e consequentemente a produtividade das máquinas críticas de <i>Grinding & Mount</i>.
A empresa está preparada para realizar manutenção preditiva?	A empresa é capaz de suportar todos os custos associados ao processo de implementação de manutenção preditiva, desde sensores e <i>softwares</i> até ao custo de mão de obra qualificada.

São as técnicas específicas, as técnicas adequadas?

Sim, as técnicas de monitorização do estado da condição do equipamento são adequadas na previsão de falhas e/ou avarias.

Este é o fornecedor adequado?

O fornecedor das bombas de vácuo apresenta pouca informação acerca do equipamento, porém como a máquina de *Grinding & Mount* é dependente deste modelos de bombas de vácuo de anel líquido, não existe outra solução.

Há alguma forma de atender a isso ao invés de adquirir equipamentos e/ou serviços?

Não, a única forma de prever a condição deste tipo de equipamentos passa pela aquisição de sensores capazes de caracterizar o atual estado de condição. O fornecedor indica que devem existir manutenções anuais às bombas de vácuo, no entanto estas não são suficientes, visto que o equipamento tende a falhar e/ou avariar ao fim de dois meses.

3.4 ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS

A análise de modos e efeitos de algumas falhas existentes e reportadas essencialmente pelos técnicos de manutenção da empresa foi uma das fases iniciais do projeto, com elevado grau de importância. Esta análise incidiu apenas em alguns dos problemas mais comuns existentes em componentes e pode ser retratada como um pequeno esboço do cenário existente no início do projeto.

Assim sendo, foi constituída uma pequena equipa de análise com conhecimentos acerca das complicações existentes no equipamento e possíveis ações de melhoria. O foco da análise incidiu em componentes tais como, o rotor, os rolamentos, o motor elétrico, o veio, a válvula de sucção, válvula de escape e a alimentação.

De acordo com os modos de falha e as potenciais causas, foram atribuídas classificações aos parâmetros ocorrência, deteção e severidade, numa escala compreendida entre 1 e 10.

Finalizada a análise de modos e efeitos das falhas, detetou-se a existência de alguns componentes, tais como os rolamentos, o veio e o rotor. Os rolamentos eram os mais críticos, já que apresentavam um RPN de 160, em seguida o veio com RPN de 112 e por fim, o rotor com RPN de 80.

No caso dos rolamentos o valor de 160 de RPN é justificado devido, essencialmente, ao alto grau de ocorrência e de severidade dado que ocorrem inúmeras falhas neste tipo de componentes que provocam a redução dos níveis de vácuo, com possibilidade de danificar o produto final que está a ser fabricado.

Quanto ao veio e ao rotor, estes têm um RPN menor que pode ser justificado pela redução do grau de ocorrência. No entanto, não se pode deixar de frisar a preocupação que existe quando há ocorrência de falha, pois ao falhar a bomba de vácuo esta passa para estado inoperacional, posteriormente deixa cair o material transportado pela máquina e o produto não pode ser comercializado, já que quebra.

A Figura 27 apresenta uma parte da análise realizada a estes três componentes, demonstrando a classificação atribuída para o cálculo do RPN.

Part	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S e v	C l a s s	Potential Cause(s)/ Mechanism(s) of Failure	O c c u r	Current Process Controls	D e t e	R P N
Rolamentos	Falha no período operacional	Motor em sobreaquecimento	5		Rolamento(s) com defeito(s)	8	N.A	4	160
Veio	Falha no período operacional	Motor em sobreaquecimento	7		Veio fletido	4	N.A	4	112
Rotor	Falha no período operacional	Motor em sobreaquecimento	8		Rotor desbalanceado	5	N.A	2	80

Figura 27 - Análise FMEA aos rolamentos, ao veio e ao rotor

De modo a reduzir as potenciais falhas nestes componentes, concluiu-se que a criação de um plano de manutenção preventiva e a implementação de manutenção preditiva seriam uma mais-valia e que iria permitir reduzir o RPN de cada componente. Dado que, a severidade é igual para o produto final existindo ou não existindo planos de manutenção, a redução do RPN teria de ser efetuada através da redução dos índices de ocorrência e de deteção. Posto isto, a manutenção preventiva mais focada na redução da ocorrência e a manutenção preditiva dedicada, essencialmente, à rápida e eficiente deteção de falhas.

As ações tomadas de implementação de manutenção preventiva e de manutenção preditiva apontam para uma redução de 120 do valor de RPN nos rolamentos, de 84 no veio e de 32 no rotor. A Figura 28 demonstra a possível redução número de prioridade de risco para estes três componentes.

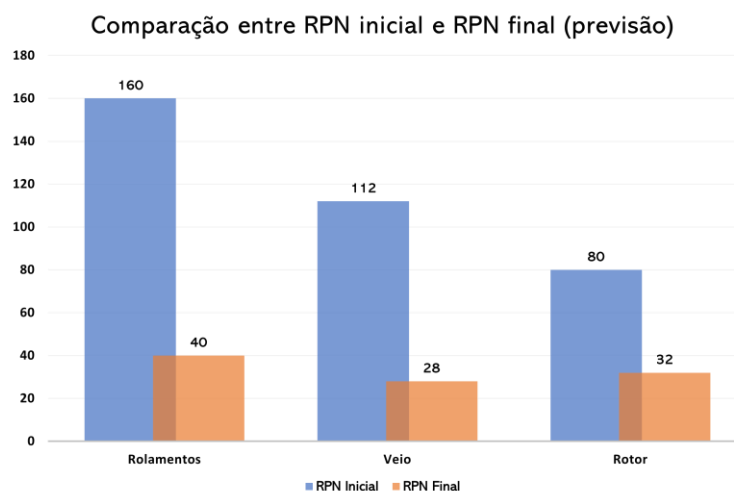


Figura 28 - Previsão da redução do RPN após ações tomadas

Por fim, é de evidenciar que os restantes componentes analisados apresentaram o RPN baixo e por esse motivo, não existiram motivos para tomar ações mais específicas, já que o plano de manutenção preventiva englobava esses componentes e assim, reduzir mais o número de prioridade de risco.

3.5 PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A criação do plano de manutenção preventiva foi um dos tópicos conversados na fase preliminar do projeto e após a identificação das complicações existentes nas bombas de vácuo de anel líquido, foi decidido que era algo a criar e a implementar. Posto isto, o plano de manutenção preventiva não só foi criado e implementado como uma ferramenta de redução de avarias e falhas, como também para atuar como base para a manutenção preditiva a ser implementada, já que esta é uma vertente preventiva.

Antes do início do desenvolvimento dos planos de manutenção preventiva, a empresa não efetuava as reparações dentro da fábrica, isto é, as reparações ou eram realizadas em empresas portuguesas ou pelo fabricante, no Japão, o que implicava elevados custos de transporte. Porém, com o desenvolvimento dos planos decidiu-se alocar as ações de manutenção preventiva a um técnico de manutenção da ATEP, que já era responsável por outros tipos de manutenções, e assim realizar as manutenções *in-house*, de modo a serem mais breves e a reduzir os custos associados à reparação deste tipo de equipamentos.

Inicialmente, foram analisadas as duas bombas de vácuo respeitantes aos dois sistemas preditivos a serem implementados, ou seja, a bomba de vácuo da máquina WLPBSG-0004 e a bomba de vácuo da máquina WLPGMP-0005. O equipamento agregado à máquina WLPBSG-0004 apresentava menos relatórios de avaria, maior MTBF e um

menor número de intervenções ao ser comparado com o equipamento agregado à máquina WLPGMP-0005, logo foi necessário realizar dois planos distintos para as bombas de vácuo.

Apesar do fabricante destes equipamentos indicar que se devem realizar manutenções anuais a certos componentes, estas manutenções indicadas não eram suficientes em certos casos devido à regularidade de avarias reportadas ao longo dos anos, no entanto os planos de manutenção preventiva criados tiveram em consideração as informações presentes no manual das bombas de vácuo de anel líquido.

Quanto à bomba de vácuo da WLPBSG-0004, foram reportadas cinco intervenções e um valor aproximado de 145 dias de MTBF, posto isto decidiu-se criar um plano de manutenção com ações semestrais. Este plano criado visa, essencialmente, preservar os componentes mais críticos e agir de forma a se obter a maior disponibilidade possível do equipamento. A Figura 29 apresenta uma tabela que descreve as ações de manutenção a realizar a cada componente ou sistema e a periodicidade de cada uma das ações.

Componente/Sistema	Descrição da ação de manutenção	Periodicidade	
		Diária	Semestral
Caudais	Inspecionar	X	
Ruído	Inspecionar	X	
Vibrações	Inspecionar vibrações no sistema de monitorização <i>offline</i>	X	
Gás de contacto	Desmontar, limpar e inspecionar		X
Interior da bomba	Limpar e remover contaminações e oxidação		X
Rolamentos	Inspecionar e/ou substituir		X*
Palhetas	Inspecionar e/ou substituir		X*
Vedantes	Inspecionar e/ou substituir		X*
Veio	Inspecionar e/ou substituir		X
Rotor	Inspecionar e/ou substituir		X
Válvulas	Inspecionar e/ou substituir		X
Alimentação	Inspecionar e/ou substituir		X

(*) - Obrigatório substituir após 8000 horas ou ao fim de um ano.

Figura 29 - Plano de manutenção preventiva do sistema *offline*

No que toca à bomba de vácuo da WLPGMP-0005, foram reportadas onze intervenções e um valor de MTBF de aproximadamente 66 dias, e por isso decidiu-se reduzir a periodicidade das ações de manutenção, ou seja, realizar intervenções de manutenção trimestrais. A passagem para ações de manutenção trimestrais ao invés de semestrais deveu-se ao facto deste equipamento avariar com mais frequência e por ser mais requisitado, visto que a WLPGMP-0005 raramente se encontra inoperacional.

O plano de manutenção desenvolvido para a bomba agregada ao sistema *online*, ou seja, da máquina WLPGMP-0005, encontra-se representado na Figura 30.

Componente/Sistema	Descrição da ação de manutenção	Periodicidade	
		Diária	Trimestral
Caudais	Inspecionar	X	
Ruído	Inspecionar	X	
Vibrações	Inspecionar vibrações no sistema de monitorização <i>online</i>	X	
Gás de contacto	Desmontar, limpar e inspecionar		X
Interior da bomba	Limpar e remover contaminações e oxidação		X
Rolamentos	Inspecionar e/ou substituir		X*
Palhetas	Inspecionar e/ou substituir		X*
Vedantes	Inspecionar e/ou substituir		X*
Veio	Inspecionar e/ou substituir		X
Rotor	Inspecionar e/ou substituir		X
Válvulas	Inspecionar e/ou substituir		X
Alimentação	Inspecionar e/ou substituir		X

(*) - Obrigatório substituir após 4000 horas ou ao fim de seis meses.

Figura 30 - Plano de manutenção preventiva do sistema *online*

Por fim, é necessário evidenciar que as ações de manutenção existentes tanto no plano de manutenção do sistema *offline*, como do sistema *online* são iguais e vão de encontro, principalmente, aos componentes mais críticos avaliados no capítulo anterior. A única diferença existente nos planos diz respeito à periodicidade, em que foi adotada uma estratégia de manutenção semestral no equipamento que opera menos e o dobro das ações de manutenção no equipamento que opera mais e possui um menor MTBF, que é o caso da bomba de vácuo agregada à máquina WLPGMP-0005.

3.6 PLANOS DE AÇÃO

Após as fases de análise de condições para implementação da manutenção preditiva e posteriormente à realização da análise de modos e efeitos de falhas das bombas de vácuo de anel líquido, houve a necessidade de definir dois sistemas de monitorização da condição do equipamento. A criação dos sistemas passou por diversas fases desde a pesquisa do melhor material segundo o orçamento disponibilizado, a programação de sensores, a instalação destes, a caracterização das variáveis de entrada e parâmetros a ser analisados, para com isto obter as variáveis de saída indicadoras do estado de condição das bombas de vácuo.

Este subcapítulo aborda e descreve sucintamente os dois sistemas criados, as variáveis de entrada de cada um dos sistemas e por fim, os métodos de análise das variáveis de entrada. É de realçar, o facto deste capítulo focar-se, essencialmente, na etapa de implementação e reunião dos dados respeitante à metodologia *Action Research*.

3.6.1 SISTEMA DE RECOLHA DE DADOS *OFFLINE*

Na fase inicial do projeto, deu-se a criação de um sistema de recolha de dados *offline*, tendo como principal foco a experimentação e a testagem da implementação de sensores de baixo custo, associados ao *software* e *boards Arduino*, na monitorização da vibração das bombas de vácuo e obtenção do estado da condição destas.

O sistema *offline* é composto por uma *board Arduino UNO R3 ATMEGA328P*, um sensor MPU-6050 da *TDK InvenSense* e um computador permanentemente conectado à *board*, de forma a recolher continuamente os dados obtidos pelo sensor.

A Tabela 21 contém toda a informação relevante acerca da constituição e funcionamento do sistema.

Tabela 21 - Descrição do sistema *offline*, componentes e a sua função e custos

Componente	Descrição e função	Custo
<i>Arduino UNO R3 ATMEGA328P</i>	<i>Board</i> , tem a capacidade de trocar simultaneamente informação com o sensor e o computador. A troca de informação apenas é possível através da programação realizada previamente no computador, com recurso ao <i>software Arduino</i> .	7,05 €
<i>MPU-6050</i>	Sensor do tipo <i>MEMS</i> , com a capacidade de medir a aceleração em três eixos e a temperatura. Tem como principal função a medição das variáveis de entrada.	3,51 €
<i>Lenovo ThinkPad T400</i>	Computador, é responsável pela programação da <i>board</i> , pela exposição dos variáveis de entrada oriundas do sensor e é também utilizado no armazenamento dessas variáveis de entrada.	Componente reaproveitado
<i>Software Arduino</i>	<i>Software</i> , é um componente virtual essencial há existência de todo o sistema físico, já que é responsável pela programação necessária da <i>board</i>	0 €

e ainda, tem a funcionalidade de expor quer de forma gráfica, quer de forma numérica as variáveis de entrada.

Software Coolterm

Software, tem como função expor e armazenar todas as variáveis recolhidas pelo sensor, em 0€ pastas no computador.

Posto isto, a criação do sistema *offline* envolveu um custo de 10,56 €, valor bastante baixo, mas que possibilita analisar a capacidade de componentes de baixo custo na implementação de manutenção preditiva.

De forma a resumir a troca de informação deste sistema, a Figura 31 apresenta um esquema que pretende sintetizar toda a informação relevante.

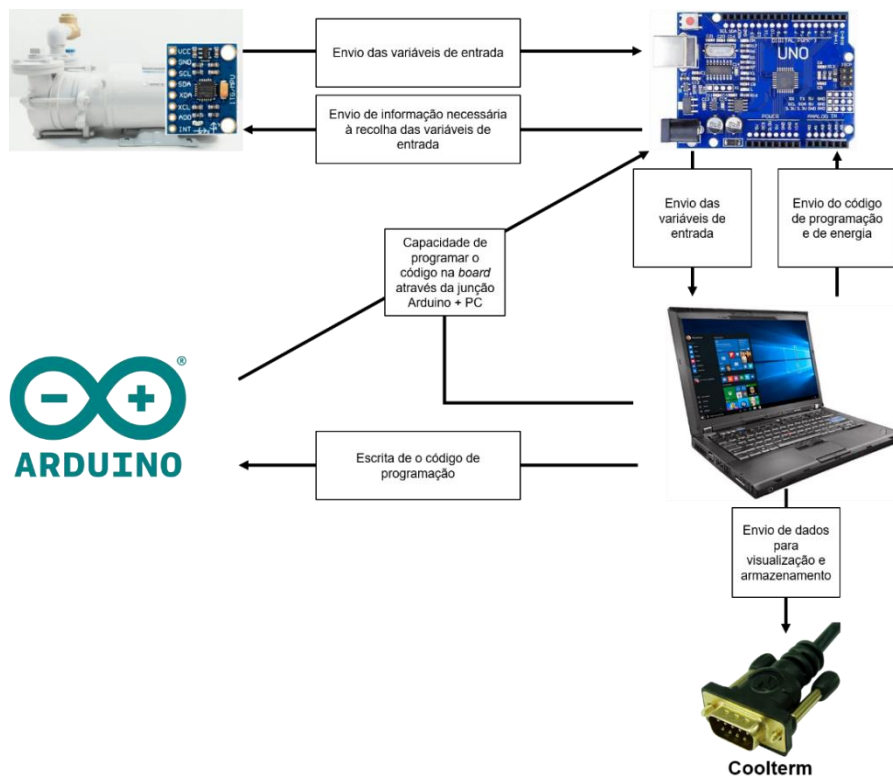


Figura 31 - Esquema de funcionamento do sistema de monitorização da condição *offline*

O sistema *offline* teve em vista a recepção de inúmeros dados recolhidos da bomba de vácuo para possibilitar a definição de parâmetros de controlo de funcionamento do equipamento.

Por fim, de maneira a demonstrar a primeira fase do projeto e todo o sistema físico desenvolvido, a Figura 32, a Figura 33 e a Figura 34 demonstram a implementação do sistema.



Figura 32 - Sensor MPU-6050

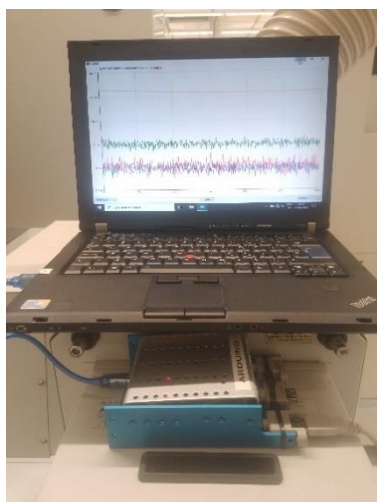


Figura 33 - Computador e Arduino



Figura 34 - Máquina

3.6.1.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA NO SISTEMA OFFLINE

As variáveis de entrada do sistema *offline* focam-se na vibração e na temperatura, ambas técnicas não destrutivas e que não afetam a operacionalidade das máquinas.

Ao nível da vibração, o sistema recolhe a aceleração em três eixos, em unidades SI, permitindo assim a fácil visualização da mudança do comportamento do equipamento, nomeadamente, ao nível dos componentes com mais vibração.

Já a temperatura é outro dos parâmetros cruciais para analisar a temperatura da bomba de vácuo, sendo que o aumento desta pode indicar possíveis falhas no futuro.

Por fim, a seleção destas duas variáveis permite otimizar a eficiência do processo de monitorização, dado que a principal vertente, a vibração, incorpora mais a condição dos componentes e a temperatura foca-se mais no fluido e nas condições operacionais.

3.6.2 SISTEMA DE RECOLHA DE DADOS *ONLINE*

Numa segunda fase, foi criado o sistema de recolha de dados *online*, sendo que a sua implementação teve como principal desígnio colmatar todas as incapacidades do sistema *offline*, principalmente ao nível da sensibilidade do sensor, precisão de resultados e disponibilização da informação continuamente num *dashboard online* para tornar a consulta do estado de condição do equipamento mais acessível a todos os engenheiros de equipamento.

Além da vertente *online*, o sistema está preparado para desempenhar funções de forma *offline*, já que é possível o utilizador conectar-se à *board* através da conexão próxima via *Bluetooth*, conexão útil em casos de inexistência de conexões *wifi*.

A indústria dos semicondutores faz uso de máquinas incomuns no mercado tradicional e com pouca vibração e por esse motivo, foi prioritária a escolha de um sensor preciso e com bastante sensibilidade, de modo a agir antecipadamente e com o maior rigor possível ao nível das ações de manutenção.

O sistema *online* é constituído apenas por uma *board* que contém múltiplos sensores e um módulo *wifi*. Estes componentes foram adquiridos à empresa *STMicroelectronics*, uma das melhores empresas na produção de sensores do tipo *MEMS*.

A Tabela 22 contém toda a informação relevante acerca dos componentes utilizados e o seu funcionamento.

Tabela 22 - Descrição do sistema *online*, componentes e a sua função e custos

Componente	Descrição e função	Custo
STEVAL-STWINKT1B	<i>Board</i> que possui múltiplos sensores incorporados e um módulo de transmissão <i>Bluetooth</i> . É responsável pela recolha de variáveis de entrada através de seis sensores.	91,00 €
STEVAL-STWINWV1	Módulo de transmissão, responsável pela adição da conexão <i>wifi</i> 2.4 GHz à <i>board</i> e que possibilita o envio das variáveis de entrada para uma <i>cloud</i> .	25,03 €

De acordo com os dados apresentados, conclui-se assim, que o custo final de todo o material adquirido foi de 116,03 €, valor bastante superior comparativamente ao que foi despendido no primeiro sistema implementado. Através da disponibilização de mais fundos monetários foi possível adquirir sensores de excelente qualidade que permitem

visualizar os parâmetros cruciais de monitorização da condição do equipamento com alta precisão e de forma mais equilibrada, isto é, a deficiente calibração existente no sistema *offline* já não é perceptível neste.

A Figura 35 realiza uma representação de funcionamento do sistema através de um pequeno esquema.

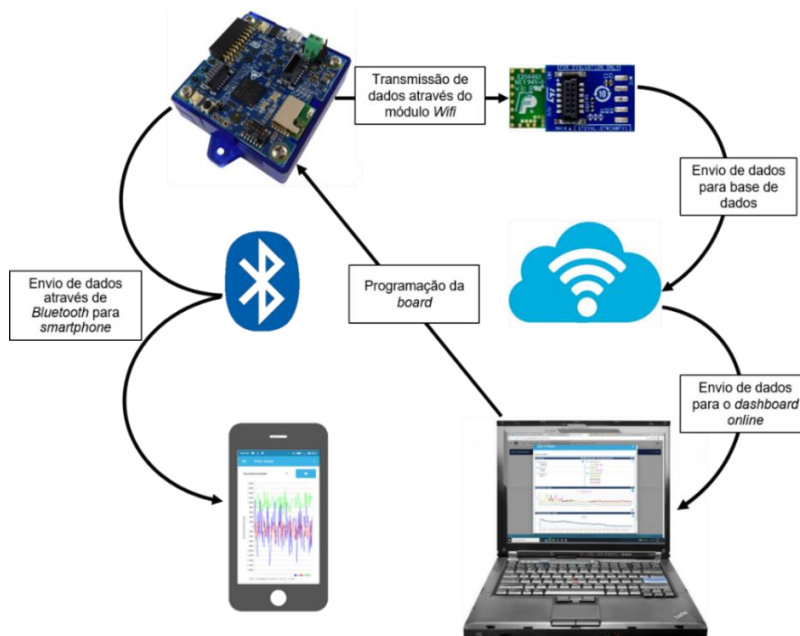


Figura 35 - Esquema de funcionamento do sistema de monitorização da condição *online*

Por fim, a Figura 36 e a Figura 37 demonstram como foi implementado o sistema físico *online* nas bombas de vácuo de anel líquido.



Figura 36 - Sensor STEVAL-STWINKT1B implementado



Figura 37 - Sensor implementado

3.6.2.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA NO SISTEMA ONLINE

O sistema *online* possui o dobro das variáveis de entrada existentes no sistema *offline*, o que proporciona maior previsão da condição do equipamento, possibilitando observar de diversas formas o comportamento das bombas de vácuo. Neste caso, as variáveis incidiram sobre condições tanto do equipamento, como do ambiente circundante, sendo elas:

- Condições do equipamento:
 - Velocidade (mm/s);
 - Aceleração (m/s^2);
 - Som (dB).
- Ambiente Circundante:
 - Pressão (mbar);
 - Humidade (%rH);
 - Temperatura ($^{\circ}C$).

De acordo com as variáveis de entrada indicadas anteriormente, o sistema dá informações relevantes a quem analisa a condição da máquina, agilizando a compreensão dos valores e criando *outputs* de qualidade.

As variáveis de entrada no sistema *online* podem ser disponibilizadas de algumas formas. No modo de *dashboard online*, existem duas alternativas de visualização, uma expõe todas as variáveis no mesmo painel e a última apenas dá a conhecer as variáveis que o utilizador seleciona. A última hipótese é de extrema importância, visto que selecionando as variáveis de interesse torna-se possível estipular valores-limite e quando esses valores-limite são ultrapassados, o *dashboard* apresenta e armazena alertas.

Tal como já foi referenciado no subcapítulo 3.5.2, o sistema também está preparado para funcionar em modo *offline*.

3.6.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA

A fase de seleção de variáveis de entrada foi determinante para avaliar a operacionalidade e condição dos equipamentos. Porém, a posterior análise e tratamento destas também possui um papel crucial na definição final dos sistemas.

Tanto no sistema *offline*, como no sistema *online*, as variáveis foram recolhidas durante inúmeros dias para se obter dados suficientes para a caracterização de parâmetros limite de operacionalidade. No caso do primeiro sistema, a quantidade de dados é superior já que foram recolhidos dados desde o mês de outubro até ao mês de março, já no segundo sistema a quantidade de dados é inferior dado à sua implementação se ter realizado apenas no mês de dezembro.

3.6.3.1 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA NO SISTEMA OFFLINE

Inicialmente, no primeiro sistema implementado, foram explorados diversos métodos de análise de dados com o intuito de entender qual seria mais eficaz na determinação de valores-limite de operação do equipamento, desde métodos básicos até à utilização de ferramentas da qualidade.

Apesar da quantidade de métodos aplicados, foi decidido que o tratamento dos dados diários passaria pela utilização da carta de controlo do tipo I-MR. A escolha da carta de controlo I-MR deu-se devido a ser uma carta de valores individuais e pela imperfeita calibração do sensor utilizado, isto é, essa imperfeita calibração provocava o aparecimento de valores máximos, médios e mínimos com menor grau de fiabilidade, no entanto a amplitude máxima, média e mínima era certa em todo o período operacional.

Após a ferramenta de tratamento das variáveis de entrada estar definida, a utilização dos softwares *Excel* e *Minitab* passaram a ter enorme relevo na análise. O *Excel* foi utilizado para converter o conteúdo presente no ficheiro (.txt) em colunas de dados por categoria e posteriormente, para a realização de gráfico. Já o *Minitab* foi utilizado na execução rápida das cartas de controlo I-MR.

Por fim, e após as cartas de controlo estarem realizadas, os dados eram separados por dia numa folha de *Excel* para posterior controlo e de modo a ter bastante histórico.

A Figura 38 apresenta um esquema que sintetiza a fase de análise de variáveis de entrada no sistema *offline*.

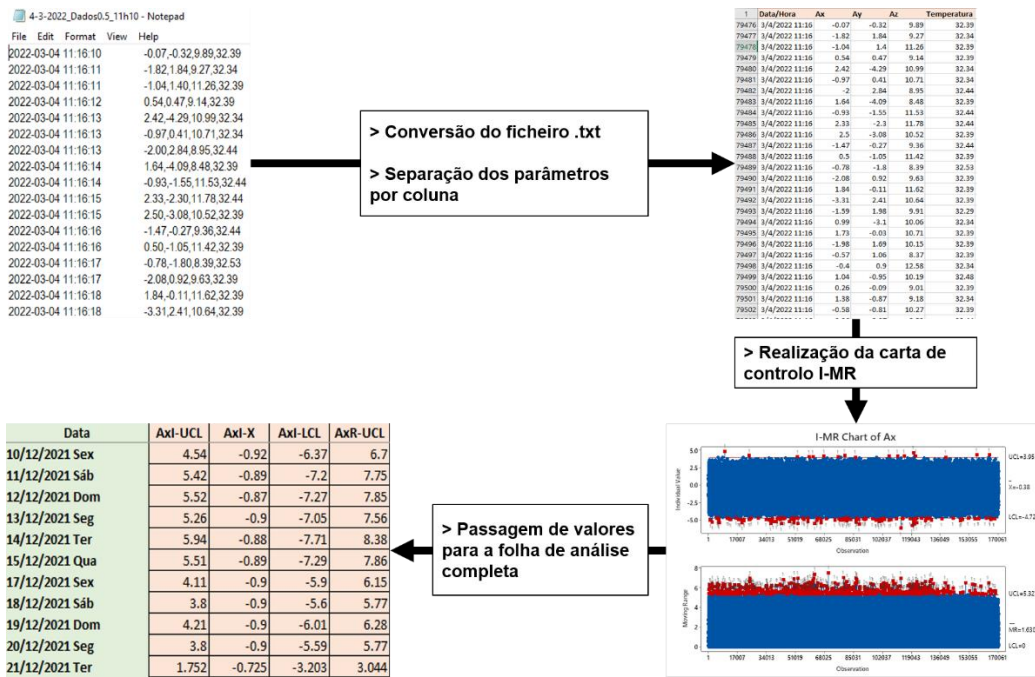


Figura 38 - Análise das variáveis de entrada no sistema *offline*

3.6.3.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA NO SISTEMA ONLINE

O sistema *online* já não envolve tarefas de conversão de ficheiros, nem tanta análise de dados, dado que todas as variáveis de entrada são armazenadas numa *cloud* e podem ser extraídas a qualquer momento. A análise de dados é ágil devido à possibilidade de estabelecer valores-limite para cada variável, promovendo o aparecimento de alertas no *dashboard online*.

Na fase inicial, realizou-se a análise de todos os dados recolhidos e recorrendo novamente às cartas de controlo I-MR estabeleceu-se valores-limite. Apesar deste sistema compreender uma quantidade inferior de dados recolhidos, a exatidão de quando ocorrem certos tipos de falha foram determinados, visto que a bomba de vácuo avariou durante esse período, ao contrário do que aconteceu no sistema *offline*. Aquando da avaria da bomba de vácuo, foi possível verificar que os valores-limite foram ultrapassados dias antes, confirmando-se posteriormente a falha nos dias seguintes a essa alteração.

De modo a caracterizar esta análise de variáveis de entrada, os dados foram armazenados todos os dias, sempre de acordo com uma única amostra diária, em Excel. Um exemplo dessa amostra diária recolhida encontra-se representado na Figura 39 e a Figura 40 expõe essas amostras organizadas ao longo dos dias.



Figura 39 - Exemplo de amostra diária recolhida

Dia	Ax (m/s2)	Ay (m/s2)
4/1/2022 Ter	10.53	18.24
5/1/2022 Qua	11.81	21.76
6/1/2022 Qui	10.92	16.61
13/1/2022 Qui	23.59	29.27
14/1/2022 Sex	23.7	33.79
15/1/2022 Sáb	28.03	38.27
17/1/2022 Seg	16.71	13.87
18/1/2022 Ter	9.99	19.72
19/1/2022 Qua	9.24	20.84
20/1/2022 Qui	9.68	18.66
21/1/2022 Sex	10.39	18.43
22/1/2022 Sáb	11.84	17.97
23/1/2022 Dom	11.7	19.23
24/1/2022 Seg	11.67	21.69
25/1/2022 Ter	11.69	19.56
26/1/2022 Qua	11.1	21.52
27/1/2022 Qui	14.15	23.41
28/1/2022 Sex	11.84	18.03
29/1/2022 Sáb	14.75	15.14

Figura 40 - Amostras organizadas em Excel

3.7 DEFINIÇÃO DOS VALORES-LIMITE OPERACIONAIS

A definição dos valores-limite operacionais apenas é possível quando existem inúmeros dados e elevado histórico acerca do funcionamento do equipamento. No entanto, esse histórico de dados requer análises por parte da engenharia, de forma a conseguir interpretar e definir limites relevantes.

Como já foi referido anteriormente, a implementação do sistema *offline* deu-se antes da implementação do sistema *online* e por esse motivo, o histórico de informações é superior no primeiro sistema. Porém, a quantidade nem sempre significa qualidade e este é o caso, já que se denotou que o sistema *online* é capaz de recolher variáveis de entrada com maior grau de precisão, sendo que retrata melhor a realidade de funcionamento das bombas de vácuo.

É de evidenciar que a bomba de vácuo associada ao sistema *offline* não avariou durante o período de monitorização e posto isto, não é possível indicar com maior grau de precisão o estado adequado de operação do equipamento. No entanto, a bomba de vácuo agregada ao sistema *online* avariou pouco tempo depois da implementação do sistema, o que potencializou o aparecimento de valores caraterísticos antes e durante o momento em que se deu a avaria.

3.7.1 VALORES-LIMITE OPERACIONAIS NO SISTEMA OFFLINE

Este subcapítulo enquadra-se na fase de análise de resultados da metodologia *Action Research*.

Tal como foi referido noutros subcapítulos anteriores, a bomba de vácuo agregada ao sistema *offline* nunca foi alvo de avaria ou falha no período observado e por esse motivo, a determinação de valores-limite operacionais não foi possível. Porém, ao longo de seis meses conseguiu-se ver o aumento das vibrações neste tipo de equipamentos, nomeadamente ao nível da aceleração no eixo do x e no eixo do z e posto isto, é de evidenciar que o estudo contínuo destas máquinas irá proporcionar a curto prazo os tais valores-limite operacionais necessários à caracterização da bomba de vácuo.

No que toca à aceleração no eixo do x e no eixo do z, foi possível visualizar o aumento da variável continuamente ao longo do tempo e desse modo, pode-se dizer que são duas variáveis com transmitem algum grau de fiabilidade na análise por parte da engenharia. A Figura 41 e a Figura 42 demonstram o comportamento observado ao nível da aceleração em x e da aceleração em z, respetivamente.

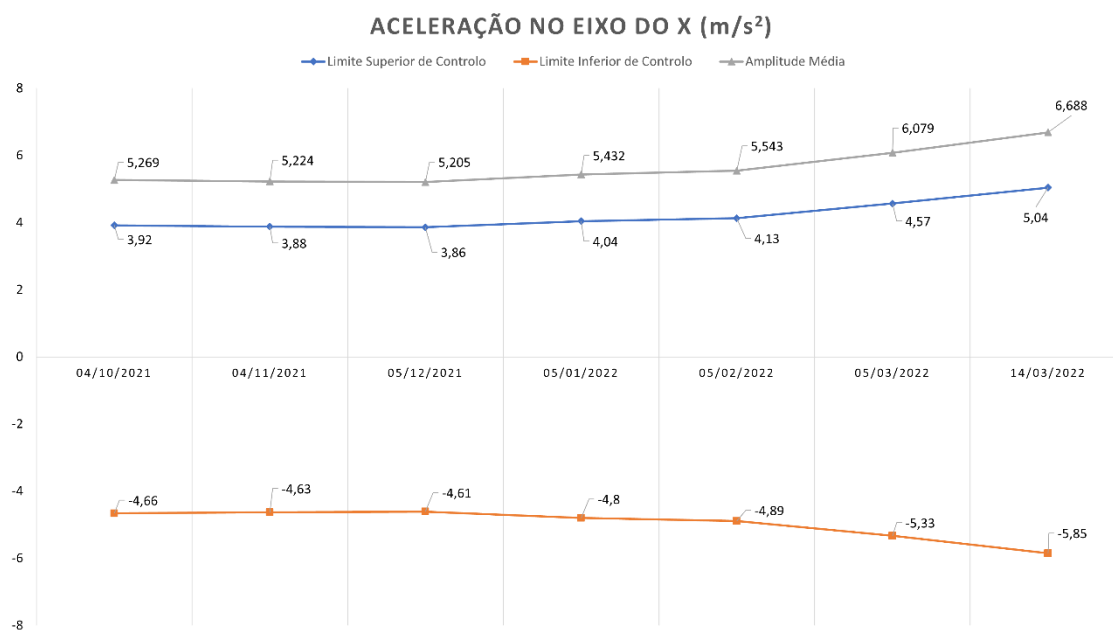


Figura 41 - Gráfico do comportamento da variável A_x no período em análise

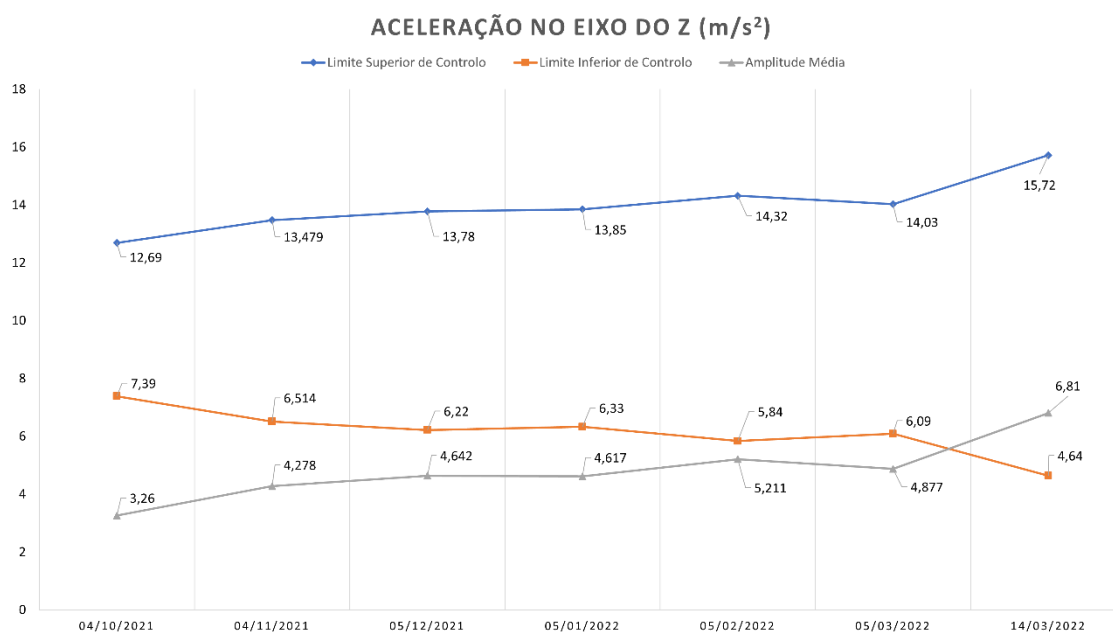


Figura 42 - Gráfico do comportamento da variável A_z no período em análise

Ao nível da temperatura, visualizou-se uma mudança linear no seu comportamento ao longo do tempo, o que representa outra variável fiável de ser estudada, porém mais difícil já que as diferenças entre valores são mínimas. A Figura 43 expõe o comportamento da variável temperatura no tempo de estudo.

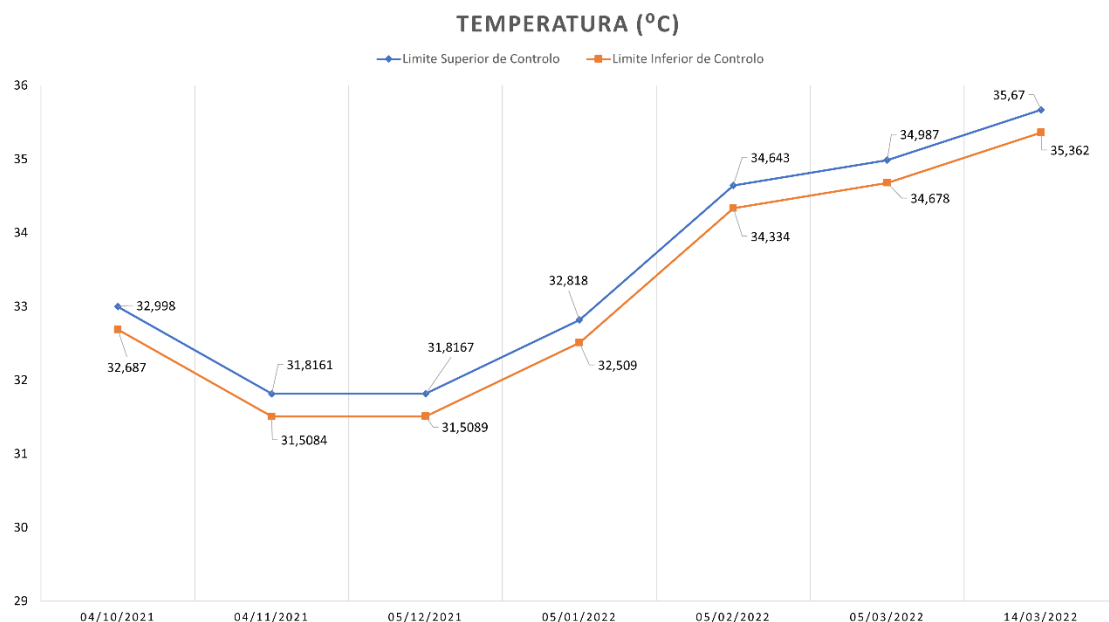


Figura 43 - Gráfico do comportamento da variável Temperatura no período em análise

Quanto à variável da aceleração no eixo do y, o seu comportamento foi bastante instável, pelo que não deverá ser uma variável a ser estudada. O gráfico presente na Figura 44 demonstra o comportamento desta variável no tempo observado.

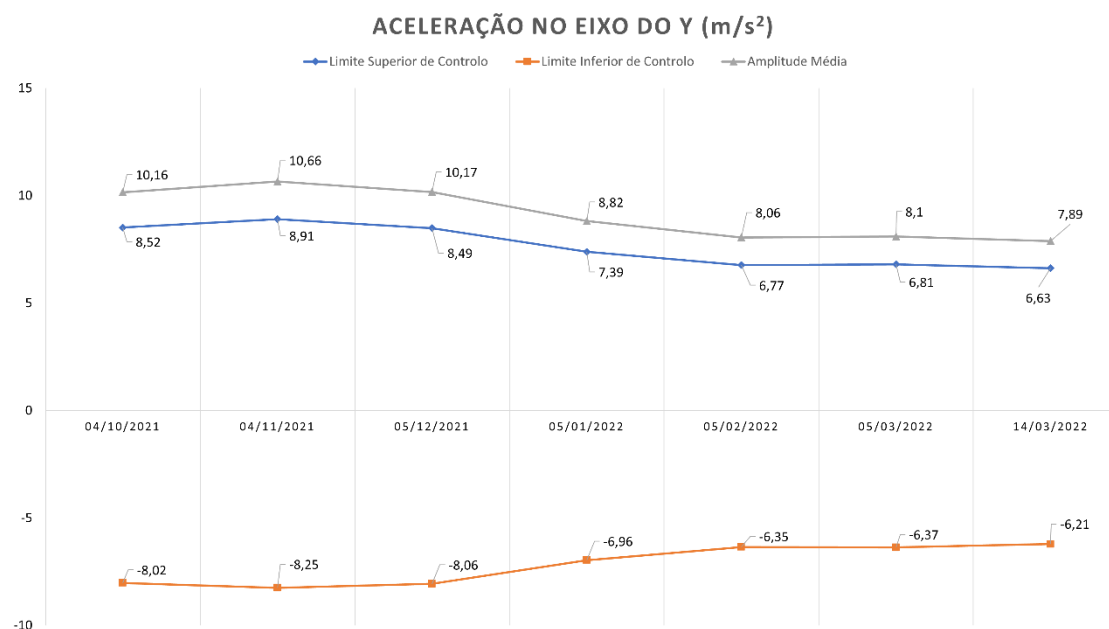


Figura 44 - Gráfico do comportamento da variável A_y no período de análise

3.7.2 VALORES-LIMITE OPERACIONAIS NO SISTEMA *ONLINE*

Os valores-limite operacionais da bomba de vácuo de anel líquido, monitorizada pelo sistema *online*, foram mais acessíveis de determinar. A facilidade em determiná-los está relacionada ao facto deste equipamento ter avariado após a implementação do sistema, permitindo assim, visualizar com exatidão o estado das variáveis de entrada nos dias anteriores e durante o dia em que ocorreu a avaria.

De modo a demonstrar a mudança de comportamento das variáveis de entrada, no período evidenciado anteriormente, a Figura 45 contém um gráfico da aceleração e a Figura 46 um gráfico da velocidade.

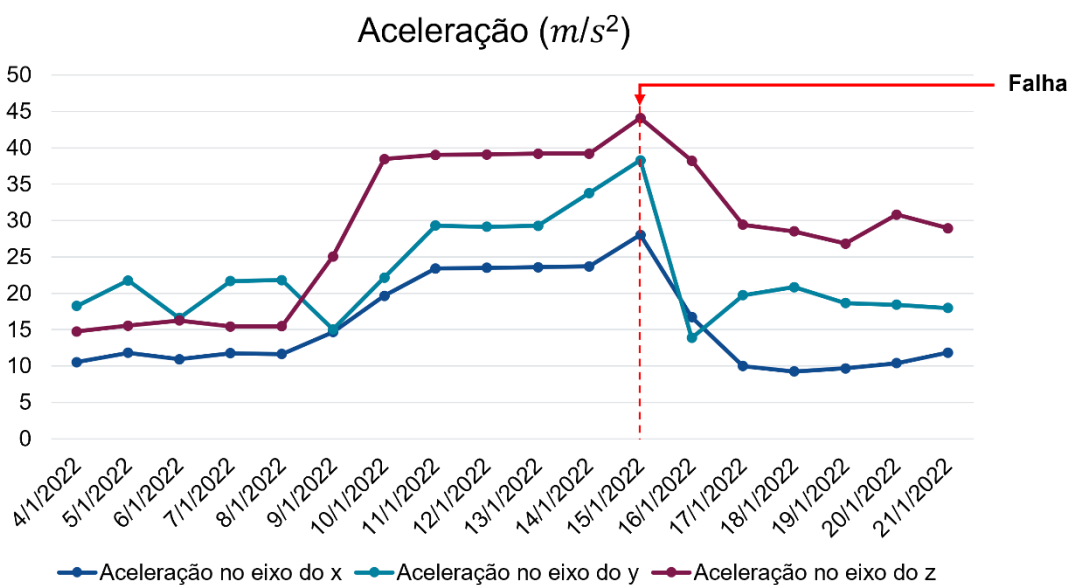


Figura 45 - Gráfico do comportamento da variável Aceleração nos períodos antes e após ocorrência de falha

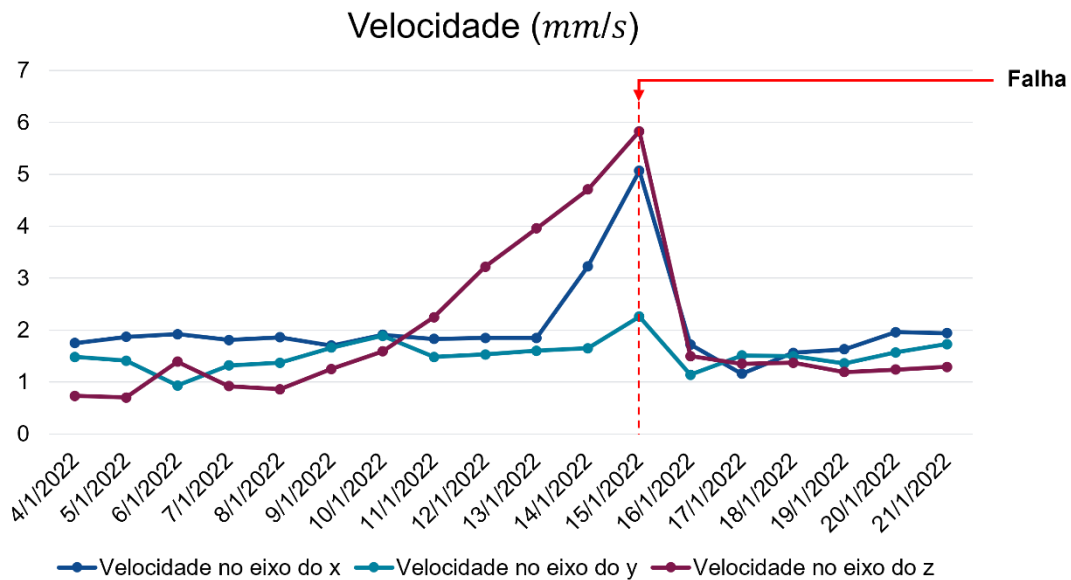


Figura 46 - Gráfico do comportamento da variável Velocidade nos períodos antes e após ocorrência de falha

Através da leitura e interpretação dos gráficos expostos nas duas figuras anteriores, é possível visualizar que a variável da velocidade demonstra de forma mais clara o aumento da vibração existente na bomba de vácuo antes e durante o momento em que ocorre a avaria. O facto de se visualizar uma progressão mais contínua da vibração no gráfico da velocidade ao invés do que acontece no gráfico de picos de aceleração, deve-se às frequências mais baixas, ou seja, até 1000 Hz. Nesta gama de frequência a utilização de sensores de velocidade é a mais correta, tal como foi citado no subcapítulo 2.4.3.

De acordo com a monitorização das emissões acústicas, não foi possível visualizar alterações relevantes, pelo que os ruídos emitidos pelas diversas máquinas presentes na área influenciaram o grau de precisão do sensor. A Figura 47 demonstra em forma de gráfico os valores das emissões acústicas recolhidos na fase da falha do equipamento.

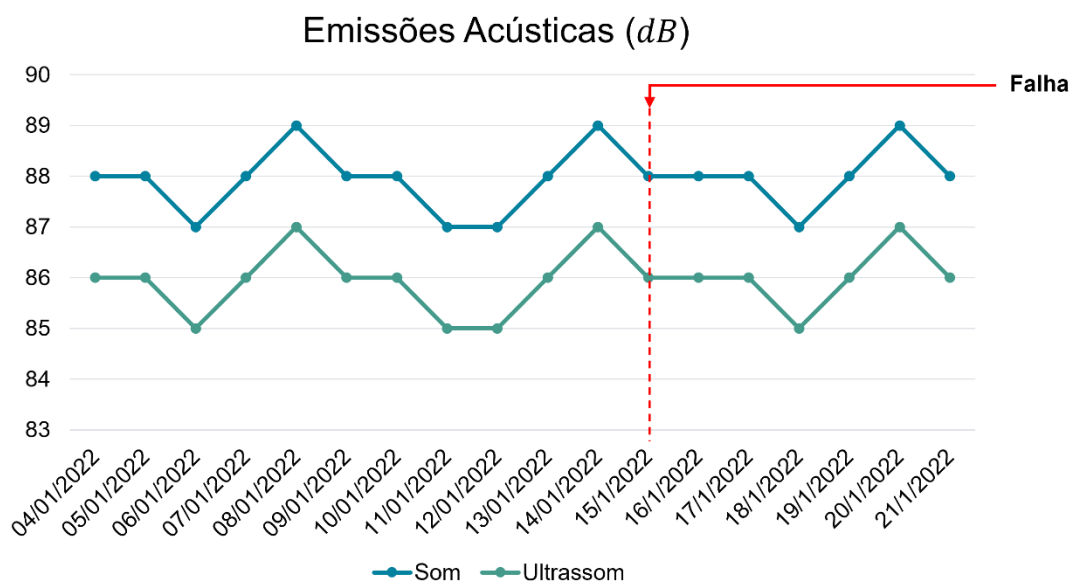


Figura 47 - Gráfico do comportamento da variável Emissões Acústicas nos períodos antes e após ocorrência de falha

Ao nível da temperatura, houve um ligeiro aumento no momento antecedente da falha e no mesmo dia, no entanto denotou-se alguma dificuldade em estabelecer valores-limite operacionais dado que a temperatura não altera de forma discrepante. A Figura 48 demonstra o comportamento da temperatura nos momentos antes, durante e após a avaria.

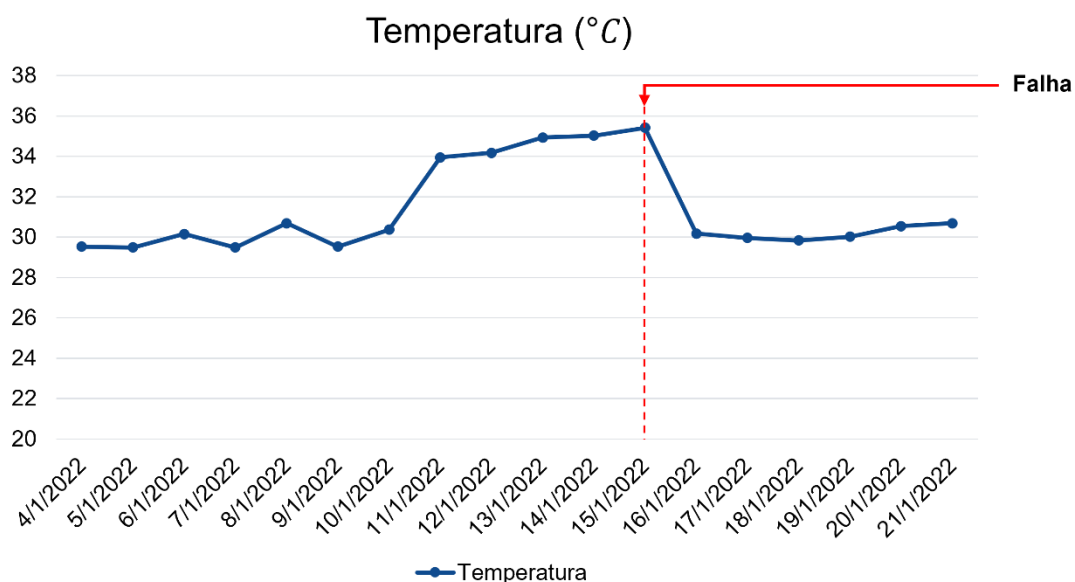


Figura 48 - Gráfico do comportamento da variável Temperatura nos períodos antes e após ocorrência de falha

No que toca à humidade relativa e à pressão, não se verificou nenhuma alteração destas variáveis, o que indica que não são relevantes para a monitorização da condição do equipamento. Ambas as variáveis tiveram sempre um comportamento bastante estável, tal como se pode verificar nos gráficos presentes na Figura 49 e na Figura 50.

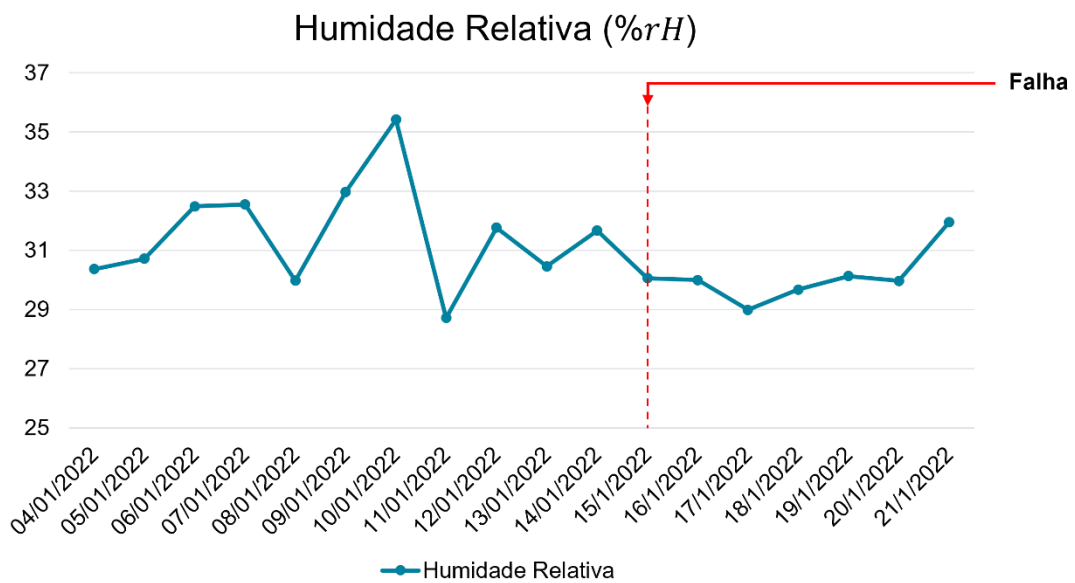


Figura 49 - Gráfico do comportamento da variável Humidade Relativa nos períodos antes e após ocorrência de falha

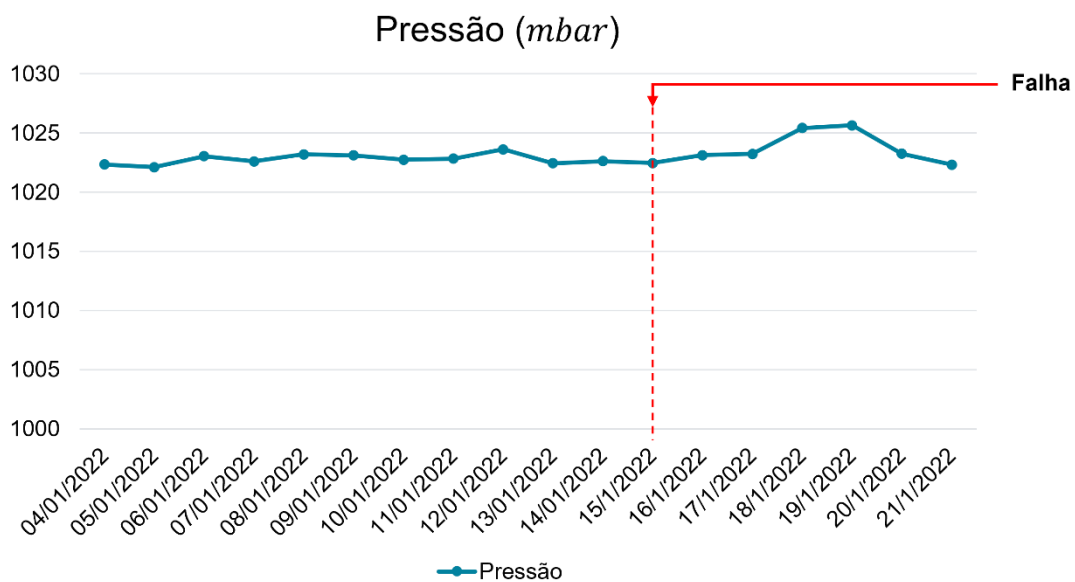


Figura 50 - Gráfico do comportamento da variável Pressão nos períodos antes e após ocorrência de falha

Em suma, apenas os parâmetros velocidade, aceleração e temperatura conseguiram oferecer resultados de confiança no estudo da condição da bomba de vácuo e por esse

motivo, as emissões acústicas, a humidade relativa e a pressão foram excluídas da análise contínua.

A obtenção de valores-limite para as variáveis não excluídas deu-se através do uso de cartas de controlo I-MR, sendo que só foram averiguados os valores respeitantes às fases de normal funcionamento do equipamento, isto é, quando se dá o sucessivo aumento das variáveis de entrada, no dia 11 de janeiro, até à avaria no dia 15 de janeiro, as variáveis apresentavam-se além do comportamento habitual e posto isto, foram eliminadas para otimizar a obtenção de valores-limite.

De modo a facilitar a análise das variáveis presentes no *dashboard online*, por parte da engenharia e dos técnicos, foi desenvolvido o fluxograma presente na Figura 51, que dá apoio na tomada de decisão e contém os valores-limite de controlo.

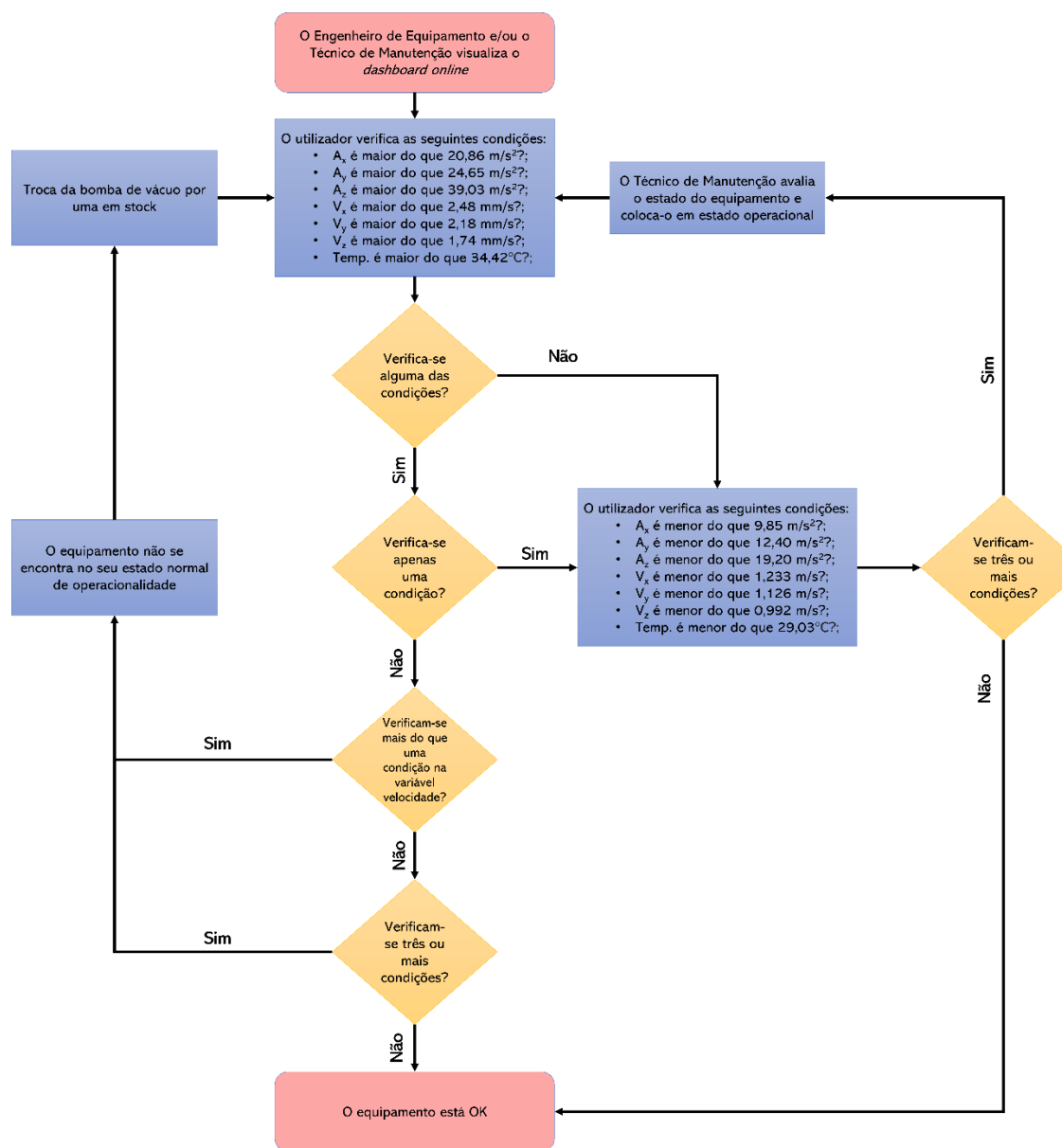


Figura 51 - Fluxograma de apoio à decisão para o sistema online

3.8 DEFINIÇÃO DOS INDICADORES-CHAVE DE DESEMPENHO

Os indicadores-chave de desempenho são métricas que avaliam o desempenho e a sua análise permite acompanhar a performance real de um equipamento, de forma a compará-la com os objetivos e resultados previstos, tal como foi indicado no subcapítulo 2.1.5.

Por esse motivo, foi fundamental recolher as informações de paragens não-planeadas e planeadas das máquinas associadas às bombas de vácuo analisadas. Essas informações foram recolhidas de um período de dois anos, desde 17 de fevereiro de 2020 até 17 de fevereiro de 2022, e os alguns *KPI's* foram calculados, tais como, MTBF, MTTR, quantidade de falhas, período máximo e mínimo de intervenção e número de intervenções.

Concluindo, o foco deste subcapítulo encontra-se na etapa de partilha de resultados da metodologia *Action Research*.

3.8.1 *KPI'S ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA OFFLINE*

A bomba de vácuo de anel líquido analisada no sistema *offline* está agregada à máquina com a denominação de WLPBSG-0004. A WLPBSG-0004 não é uma máquina crítica e é pouco utilizada comparativamente às outras do mesmo tipo no setor, pelo que a bomba de vácuo trabalha de forma mais suave e em baixa carga.

Através da análise dos dados referentes ao período de dois anos indicado anteriormente, concluiu-se que ocorreram 37615 intervenções, em que cinco delas foram falhas na bomba de vácuo.

De modo a facilitar a análise destas ações de manutenção específicas, a Tabela 23 realiza uma comparação entre as intervenções motivadas por falhas e/ou avarias na bomba de vácuo e um tipo de intervenção bastante comum na WLPBSG-0004.

Tabela 23 - Definição dos *KPI's* da bomba de vácuo comparativamente a um tipo de ação de manutenção recorrente, na WLPBSG-0004

	Manutenção da bomba de vácuo	Manutenção ou limpeza dos <i>pads</i> na máquina
MTTR	1 hora e 54 minutos	28 minutos
Período máximo de manutenção	4 horas e 20 minutos	4 horas e 10 minutos
Período mínimo de manutenção	29 minutos	9 minutos
Nº de intervenções	5 intervenções	973 intervenções
MTBF	≈ 145 dias	-

Quantidade de falhas de 5 falhas -

3.8.2 KPI'S DEPOIS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA OFFLINE

A criação de um plano de manutenção preventiva para as bombas de vácuo de anel líquido, como base para a implementação preditiva, ambiciona a otimização dos indicadores de manutenção respeitantes a este tipo de equipamentos.

Através de um estudo à base da previsão, foi possível concluir que seguindo o plano de manutenção preventiva dedicado ao sistema *offline* é possível reduzir o período máximo de manutenção face ao apresentado anteriormente em cerca de 88,5%, reduzir o período mínimo de manutenção em 31% e reduzir em cerca de 67,5% o MTTR até o ano de 2026. A redução dá-se devido à troca rápida de bomba de vácuo no equipamento num período compreendido entre 20 e 30 minutos.

A Figura 52 contém um gráfico que demonstra a previsão da percentagem de redução destes indicadores desde o ano de 2021 até ao ano de 2026.

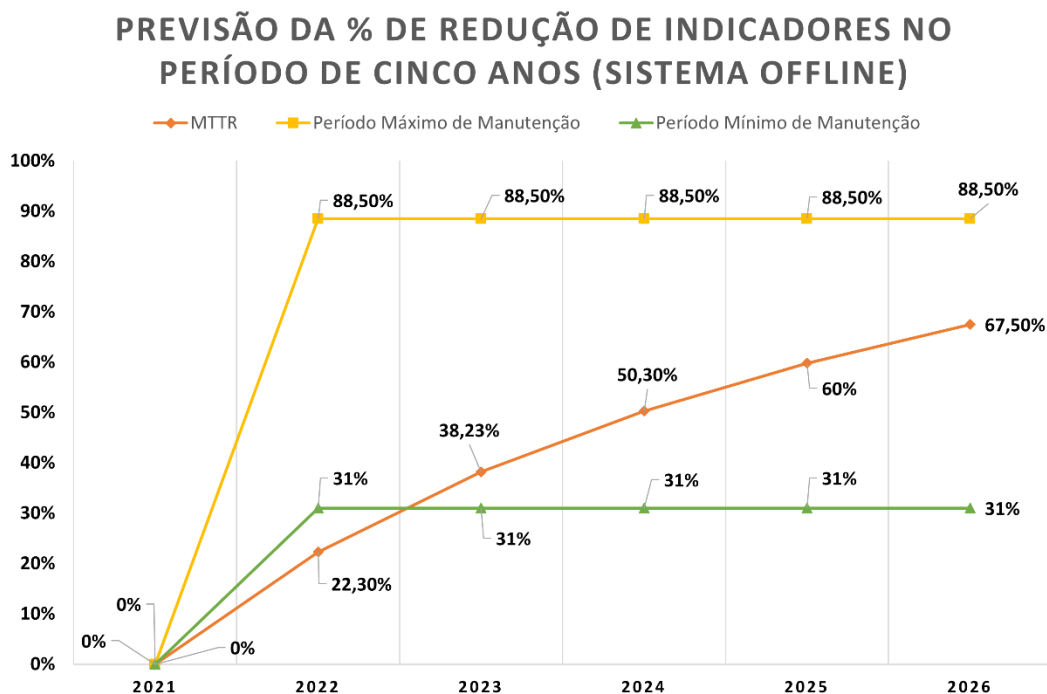


Figura 52 - Previsão da percentagem de redução de KPI's no período de cinco anos (Sistema *offline*)

Através da redução destes indicadores conclui-se que é inevitável o aumento do MTBF e o aumento da disponibilidade do equipamento, no entanto como no período

observado não foi possível presenciar a ocorrência de uma nova avaria, não foi possível determinar a previsão destes indicadores para os anos futuros.

No entanto, a manutenção preditiva vem complementar a manutenção preventiva e estima-se que através da análise do estado da condição do equipamento é possível evitar a falha e/ou avaria antes que esta ocorra, evitando assim períodos de indisponibilidade dos equipamentos e danos maiores para estes.

Em termos de custos, a implementação do plano de manutenção preventiva aliado à implementação da manutenção preditiva permitiu prever uma redução de custos em cerca de 40,5%. O estudo foi realizado num período de cinco anos e partiu-se do pressuposto de que em 2021 seria adquirida uma bomba de vácuo e assim, realizar uma previsão de redução dos custos para os cinco anos seguintes. A análise consistiu em analisar o pressuposto sem a implementação de qualquer tipo de manutenção comparativamente à implementação de planos de manutenção.

No primeiro caso, considerou-se que a aquisição de bombas de vácuo se daria de quatro em quatro anos a um custo médio de 8000 € e os custos de logística e de manutenção por parte do fabricante japonês seriam despendidos a cada ano e meio com o valor de 2500 €, todos estes valores são médios e de acordo com o histórico presente na empresa. No segundo caso, foi considerado que a aquisição de bombas de vácuo se daria a cada período de oito anos com o mesmo custo, que o custo de aquisição dos componentes para monitorizar a condição do equipamento seria de 11 €, que as ações manutenção *in-house* seriam realizadas a cada ano e meio com o custo de 500 € e por fim, assumiu-se a possibilidade de serem enviadas para o fabricante a cada três anos para ações de manutenção mais difíceis com um custo de 2500 €.

Posto isto, a Figura 53 contém um gráfico que demonstra a comparação entre a previsão de custos, em euros, antes e após a implementação dos planos de manutenção, assumindo que no ano de 2021 é adquirida uma bomba de vácuo nova.

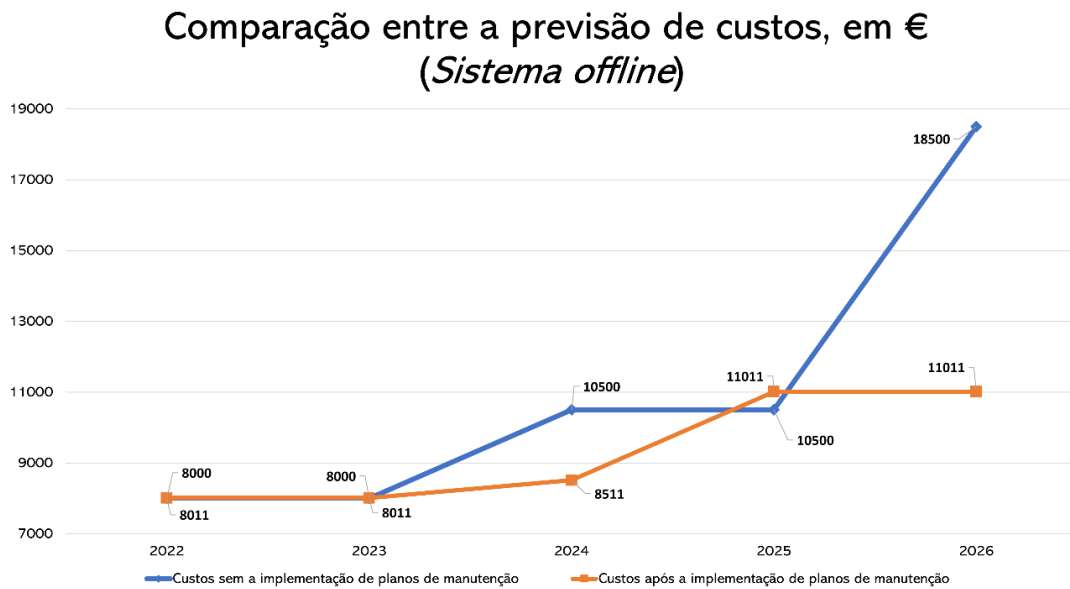


Figura 53 - Gráfico de comparação entre a previsão de custos antes e após implementação de planos de manutenção (*Sistema offline*)

3.8.3 KPI'S ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ONLINE

A bomba de vácuo de anel líquido respeitante ao sistema *online* serve a máquina com a denominação de WLPGMP-0005, sendo uma máquina bastante utilizada e consequentemente, crítica.

Através da análise dos dados referentes ao período de dois anos indicado anteriormente, concluiu-se que ocorreram inúmeras intervenções, em que onze delas foram falhas na bomba de vácuo.

De modo a demonstrar que as ações de manutenção na bomba de vácuo são mais demoradas do que outros tipos de intervenções frequentes, a Tabela 24 apresenta a comparação entre ações de manutenção na bomba de vácuo e ações de manutenção preventivas de limpeza dos *pads* na máquina.

Tabela 24 - Definição dos KPI's da bomba de vácuo comparativamente a um tipo de ação de manutenção recorrente, na WLPGMP-0005

	Manutenção da bomba de vácuo	Manutenção ou limpeza dos <i>pads</i> na máquina
MTTR	1 hora e 47 minutos	1 hora e 16 minutos

Período máximo de manutenção	6 horas e 29 minutos	4 horas e 14 minutos
Período mínimo de manutenção	26 minutos	11 minutos
Nº de intervenções	11	13512
MTBF	≈ 66 dias	-
Quantidade de falhas	11 falhas	-

3.8.4 KPI'S DEPOIS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA *ONLINE*

A previsão dos indicadores-chave de desempenho no sistema *online* indica que estes serão otimizados de forma representativa, demonstrando que a criação de um plano de manutenção preventiva foi a melhor escolha para colmatar paragens não-planeadas e redução de custos.

O estudo incidiu essencialmente no MTTR, no período máximo de manutenção e no período mínimo de manutenção, sendo que através da previsão o primeiro irá ser reduzido em torno de 63,13% ao longo dos próximos cinco anos, o segundo indicador irá obter uma redução de 92,29% e o último reduzirá em 23% face ao valor apresentado antes da implementação.

A Figura 54 apresenta um gráfico que sintetiza a previsão de redução destes indicadores de manutenção no sistema *online*.

PREVISÃO DA % DE REDUÇÃO DE INDICADORES NO PERÍODO DE CINCO ANOS (SISTEMA ONLINE)

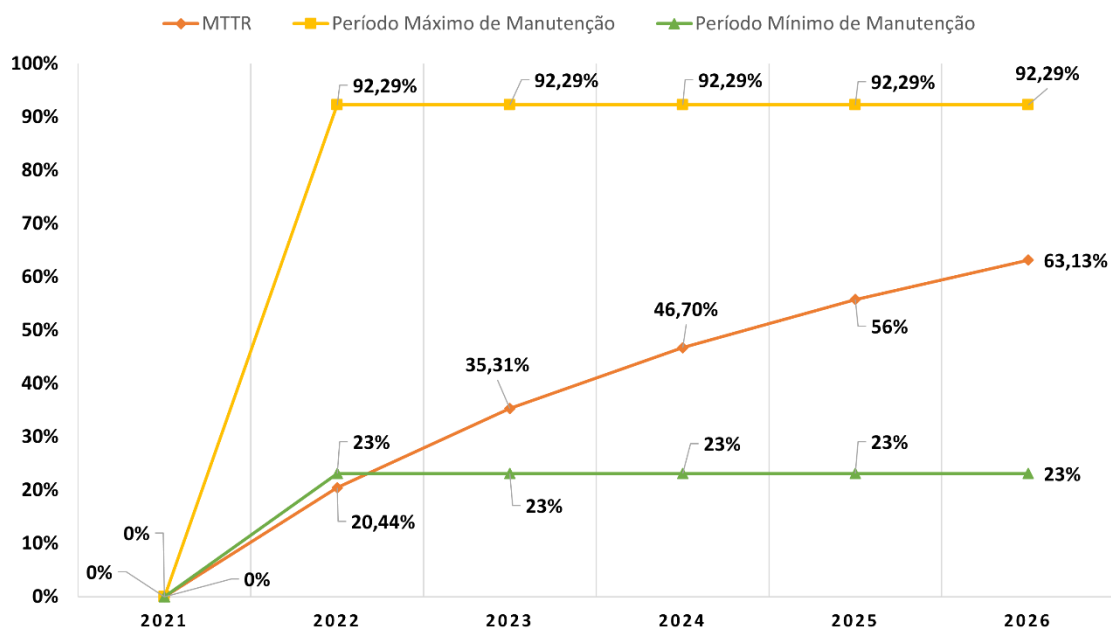


Figura 54 - Previsão da percentagem de redução de KPI's no período de cinco anos (Sistema *online*)

Como já foi indicado no subcapítulo 3.7.2, a previsão do MTBF e da disponibilidade não foi realizada devido à inexistência de dados suficientemente capazes de serem bons para os cálculos, porém é inevitável que o MTBF e a disponibilidade aumentem já que as manutenções irão ser mais frequentes e existe um sistema preditivo de futuras falhas.

No que toca à análise de custos, deu-se uma previsão bastante semelhante à realizada no subcapítulo 3.8.2, isto é, foi realizada uma previsão a partir do ano de 2021 até ao ano de 2026, em que foi comparada a previsão de custos associados à manutenção da bomba de vácuo antes e após a implementação dos planos de manutenção. O estudo conseguiu demonstrar que haverá uma redução de custos de 56,7% com a implementação das manutenções preventiva e preditiva.

No cálculo dos custos sem implementação de qualquer plano de manutenção, considerou-se que a aquisição das bombas se daria a cada dois anos com o valor de 8000 € e as ações de manutenção no fabricante aliadas aos custos de transporte rondariam os 2500 € a cada seis meses. Por outro lado, após a implementação a aquisição destes equipamentos se daria num período de seis anos com o mesmo custo, foram incluídos os custos de manutenção *in-house* com o valor de 500 € em cada ano e por fim, a possibilidade de ações de manutenção especiais no fabricante com um custo de 2500 €

a cada quatro anos. É de realçar, que todos os custos apresentados são médios e foram retirados do histórico presente na empresa.

A Figura 55 apresenta um gráfico que realiza a previsão de custos comparando os custos de manutenção sem e com a implementação de planos de manutenção nas bombas de vácuo de anel líquido.

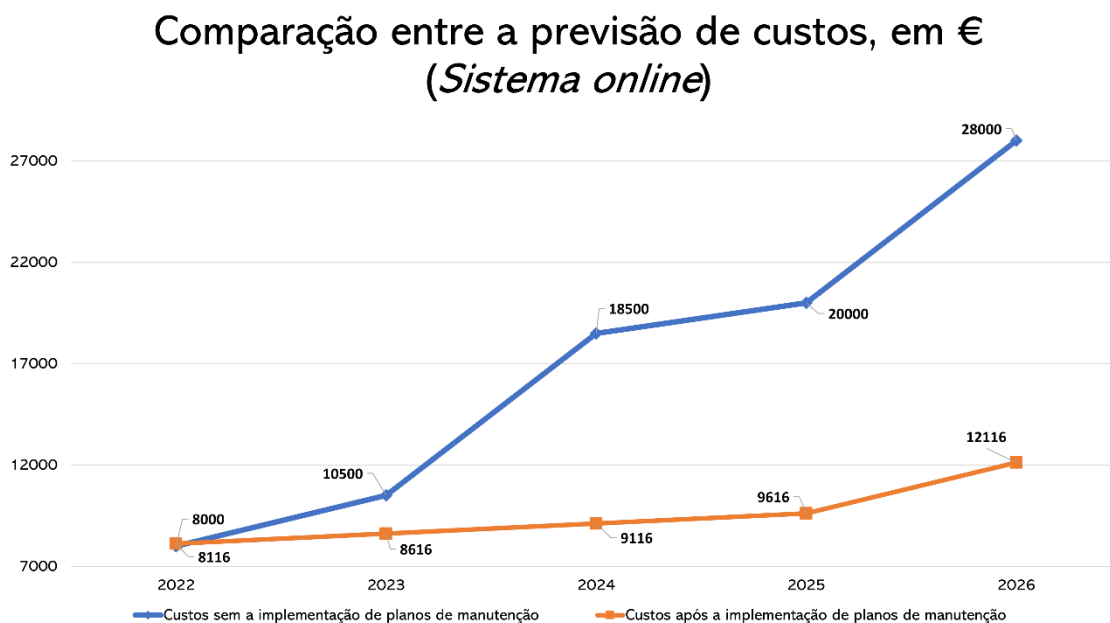


Figura 55 - Gráfico de comparação entre a previsão de custos antes e após implementação de planos de manutenção (*Sistema online*)

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Finalmente, neste capítulo respeitante às conclusões e propostas de trabalhos futuros, é exposta uma súpula de todo o projeto desenvolvido de acordo com os objetivos inicialmente delineados. Além disso, efetua-se a descrição e apresentação dos principais resultados obtidos, o contributo da conciliação da manutenção preditiva com a manutenção preventiva e por último, aborda-se futuros projetos a desenvolver e o aprimoramento dos sistemas de monitorização da condição.

De acordo com a metodologia *Action Research*, este capítulo expõe duas fases cruciais desta metodologia adotada e seguida, sendo a primeira respeitante à partilha dos resultados obtidos e a segunda fase anexa à reflexão final do processo.

4.1 CONCLUSÕES

No decorrer da realização deste trabalho, foi possível abordar na íntegra algumas das filosofias da manutenção de excelência mais requisitadas pelas indústrias a nível mundial, explorar e aplicar conceitos referentes à indústria 4.0 e desenvolver competências no campo de sensorização.

Embora o principal foco fosse a manutenção preditiva, houve a necessidade de aliar esta à manutenção centrada na fiabilidade, já que a manutenção preditiva projeta o seu desígnio para o controlo e aumento de fiabilidade dos equipamentos. Associada à manutenção baseada na condição está a indústria 4.0 e a sensorização, a indústria 4.0 através da criação de bases de dados e de *dashboards online* para monitorização da condição do equipamento em tempo-real e a sensorização como tema essencial na implementação de sensores capazes de realizar todo o processo de monitorização. Além disso, há que evidenciar a manutenção preventiva como a base para o sucesso da implementação das diversas componentes respeitantes à tão abrangente manutenção.

Através da análise de literatura desenvolvida no segundo capítulo, denotou-se que a ampla pesquisa realizada nas diversas áreas aplicáveis a este projeto, foi crucial na reformulação das ações de manutenção da empresa, permitiu envolver os colaboradores com técnicas inovadoras de manutenção, aumentar a eficácia e eficiência da manutenção, otimizar indicadores-chave de desempenho, reduzir custos e por último, e com mais importância, garantir a qualidade do produto final.

De modo a descrever o estado final do trabalho desenvolvido, apresenta-se na Tabela 25 os objetivos traçados inicialmente e o respetivo cumprimento deles ao longo do projeto.

Tabela 25 - Descrição dos objetivos traçados inicialmente e a forma como foram cumpridos

Objetivo	Como foi cumprido
<p>Implementar o primeiro sistema de manutenção preditiva na empresa</p>	<p>A ATEP até ao momento de iniciação deste trabalho, contava apenas com um sensor de baixo custo implementado numa máquina, no entanto sem capacidade de monitorizar nas condições ideais e sem a existência de um estudo aprofundado das variáveis recolhidas, ou seja, não se pode afirmar que existia manutenção preditiva implementada.</p> <p>Na fase inicial do projeto, ocorreu uma procura imensa por conhecimento na vertente preditiva e deu-se imediatamente a implementação de sensores capazes de recolher variáveis de controlo das vibrações dos equipamentos, o estudo desses dados e a criação de um elevado histórico, para executar planos de manutenção.</p>
<p>Aumentar a eficácia e eficiência da manutenção na empresa</p>	<p>Através do desenvolvimento de planos de manutenção preventiva e da implementação de manutenção nas bombas de vácuo de anel líquido, foi possível aumentar a eficácia e eficiência da manutenção que se pode justificar com os resultados obtidos ao nível dos indicadores-chave de desempenho da manutenção.</p>
<p>Melhorar o planeamento de ações de manutenção preventivas</p>	<p>O planeamento das ações de manutenção preventivas foi melhorado na medida em que foram desenvolvidos planos detalhados de manutenção para os equipamentos em estudo, o que era inexistente antes do início do estágio. A manutenção preditiva por outro lado, veio complementar os planos de manutenção preventiva e melhorar o planeamento de ações a tomar nos momentos próximos à ocorrência de falha e/ou avaria.</p>

Monitorizar e estabelecer valores-limite operacionais para os equipamentos

A monitorização da condição dos equipamentos ocorreu com a implementação de dois sistemas constituídos por sensores. Já o estabelecimento e a definição de valores-limite operacionais ocorreram como uma sequência, sendo que os dados recolhidos foram sempre armazenados para posteriormente realizar estudos do que é ou não é o comportamento saudável do equipamento.

Garantir a qualidade do produto final

A garantia da qualidade do produto final vem da conjugação dos diversos objetivos apresentados anteriormente, isto é, através da implementação da manutenção preditiva foi possível melhorar o planeamento, a eficácia e a eficiência das ações de manutenção.

Dado que a implementação de sensores consegue prever a ocorrência de falhas, os colaboradores da empresa agem de modo a evitá-las e assim, não existir o risco de quebrar uma *wafer* de silício a meio do processo de desbaste e montagem.

Em termos de valores-limite operacionais determinados, foram definidos com certeza os do sistema *online* já que foi possível observar a ocorrência de avaria, no entanto devido à ausência de falha ou avaria não foi possível determinar os valores do sistema *offline*. Posto isto, a Figura 56 apresenta um resumo dos valores definidos para o sistema *online*.

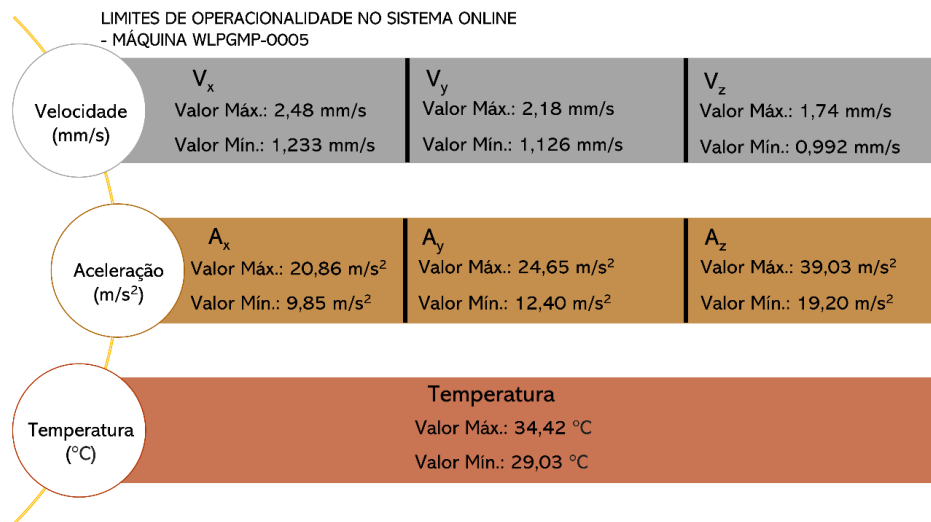


Figura 56 - Limites de operacionalidade no sistema *online*

Concluindo, o estudo realizado proporcionou resultados satisfatórios, na medida em que foi possível otimizar significativamente os indicadores-chave de desempenho da manutenção, nomeadamente o MTTR, os períodos máximos e mínimos de manutenção, a disponibilidade, o MTBF e os custos.

Ao nível da otimização dos indicadores-chave de desempenho do sistema *offline*, a Figura 57 apresenta um gráfico que expõe a previsão da percentagem de redução dos *KPI's*, num período de cinco anos.

Previsão da % de redução dos *KPI's* nos sistemas *offline* e *online*, num período de cinco anos

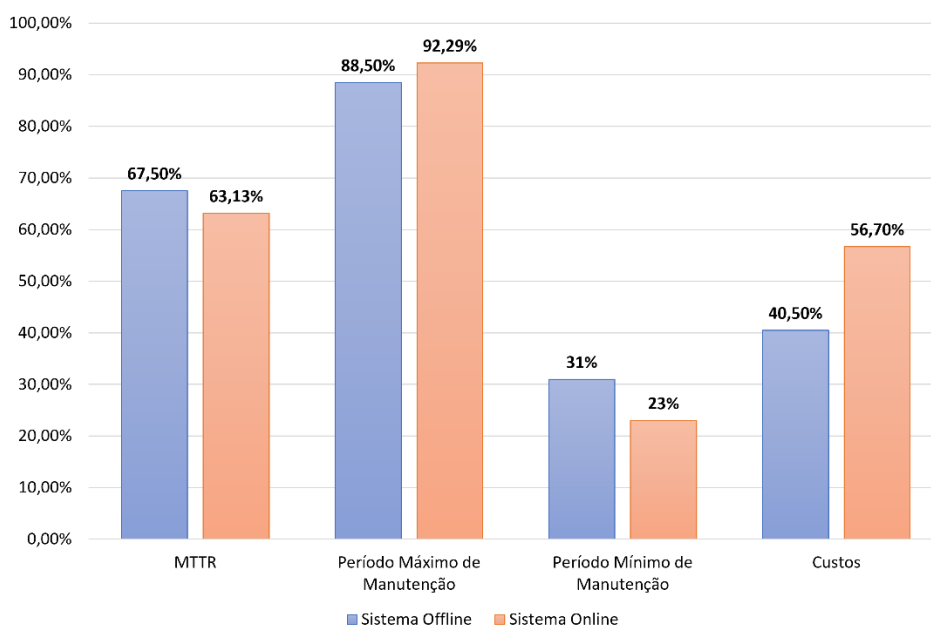


Figura 57 - Previsão da percentagem de redução dos KPI's nos dois sistemas, num período de cinco anos

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

No que toca ao trabalho futuro a desenvolver, sendo este um projeto ligado a áreas inovadoras e de com elevada complexidade tecnológica, seria interessante desenvolver uma vertente *online* para o sistema *offline* desenvolvido com a criação de uma base de dados capaz de armazenar variáveis e que se efetua o envio destas para um *dashboard online*, tal como acontece no sistema *online*.

Outra das propostas, seria a criação de um website dedicado a todos os colaboradores da empresa, que fizesse a junção dos diversos sistemas de monitorização da condição para assim, ser mais fácil aceder aos diferentes dados a serem recolhidos pelos sistemas.

Outra área de estudo, seria realizar a migração dos sistemas para outros tipos de equipamentos possíveis de serem monitorizados e incluir outros tipos de sensores para estudar o controlo de outros parâmetros.

Por fim, o desenvolvimento de uma ferramenta com a capacidade de agilizar o processo de definição de valores-limite operacionais, seria outra proposta de trabalho interessante.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Adolfsson, E., & Dahlström, T. (2011). *Efficiency in corrective maintenance - a case study at SKF Gothenburg* [Master Thesis]. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Ayo-Imoru, R. M., & Cilliers, A. C. (2018). A survey of the state of condition-based maintenance (CBM) in the nuclear power industry. In *Annals of Nuclear Energy* (Vol. 112, pp. 177–188). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.010>
- Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., & Ait-Kadi, D. (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0>
- Bengtsson, M., & Lundström, G. (2018). On the importance of combining “the new” with “the old” – One important prerequisite for maintenance in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 25, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.065>
- Bhat, J., Bhapkar, U., & Desai, M. (2021). Condition based predictive maintenance of worm gearbox using DR ferrography. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.353>
- Bravo M, D.-A., Alvarez Q, L.-I., & Lozano M, C.-A. (2021). Dataset of distribution transformers for predictive maintenance. *Data in Brief*, 38, 107454. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107454>
- Carretero, J., Pérez, J. M., García-Carballeira, F., Calderón, A., Fernández, J., García, J. D., Lozano, A., Cardona, L., Cotaina, N., & Prete, P. (2003). Applying RCM in large scale systems: A case study with railway networks. *Reliability Engineering and System Safety*, 82(3), 257–273. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00167-4)
- Chen, X., van Hilleghersberg, J., Topan, E., Smith, S., & Roberts, M. (2021). Application of data-driven models to predictive maintenance: Bearing wear prediction at TATA steel. *Expert Systems with Applications*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115699>
- Chen, Y., Cowling, P., Polack, F., Remde, S., & Mourdjis, P. (2017). Dynamic optimisation of preventative and corrective maintenance schedules for a large scale urban drainage system. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 494–510. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.027>
- Crespo Márquez, A., de la Fuente Carmona, A., Marcos, J. A., & Navarro, J. (2020). Designing CBM Plans, Based on Predictive Analytics and Big Data Tools, for Train

- Wheel Bearings. *Computers in Industry*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103292>
- Daniyan, I. A., Mpofu, K., & Adeodu, A. O. (2020). Development of a diagnostic and prognostic tool for predictive maintenance in the railcar industry. *Procedia CIRP*, 90, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.001>
- de Benedetti, M., Leonardi, F., Messina, F., Santoro, C., & Vasilakos, A. (2018). Anomaly detection and predictive maintenance for photovoltaic systems. *Neurocomputing*, 310, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.05.017>
- de Pater, I., & Mitici, M. (2021). Predictive maintenance for multi-component systems of repairables with Remaining-Useful-Life prognostics and a limited stock of spare components. *Reliability Engineering and System Safety*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107761>
- Dinardo, G., Fabbiano, L., & Vacca, G. (2018). A smart and intuitive machine condition monitoring in the Industry 4.0 scenario. *Measurement*, 126, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.041>
- Eden, C., & Ackermann, F. (2018). Theory into practice, practice to theory: Action research in method development. *European Journal of Operational Research*, 271(3), 1145–1155. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.061>
- Ekwaro-Osire, S., Gonçalves, A. C., & Alemayehu, F. M. (2017). *Probabilistic Prognostics and Health Management of Energy Systems*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55852-3>
- Enjavimadar, M. H., & Rastegar, M. (2022). Optimal reliability-centered maintenance strategy based on the failure modes and effect analysis in power distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107647>
- Ferreira, S., Silva, F. J. G., Casais, R. B., Pereira, M. T., & Ferreira, L. P. (2019). KPI development and obsolescence management in industrial maintenance. *Procedia Manufacturing*, 38, 1427–1435. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.145>
- Filz, M. A., Langner, J. E. B., Herrmann, C., & Thiede, S. (2021). Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning. *Computers in Industry*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103451>
- Florian, E., Sgarbossa, F., & Zennaro, I. (2021). Machine learning-based predictive maintenance: A cost-oriented model for implementation. *International Journal of Production Economics*, 236, 108114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108114>
- France-Mensah, J., & O'Brien, W. J. (2019). A shared ontology for integrated highway planning. *Advanced Engineering Informatics*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100929>

- Franciosi, C., Voisin, A., Miranda, S., Riemma, S., & Iung, B. (2020). Measuring maintenance impacts on sustainability of manufacturing industries: from a systematic literature review to a framework proposal. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 260). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121065>
- Fuentes-Huerta, M. A., González-González, D. S., Cantú-Sifuentes, M., & Praga-Alejo, R. J. (2021). Fuzzy reliability centered maintenance considering personnel experience and only censored data. *Computers and Industrial Engineering*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107440>
- Gulati, R. (2020). *Maintenance and Reliability Best Practices* (3ª edição). Industrial Press Inc.
- Higgins, L. R. (2008). *Maintenance Engineering Handbook* (D. J. Wikoff & K. Mobley, Eds.). MCGRAW-HILL.
- Huang, L., Ding, L., Zhou, J., Chen, S., Chen, F., Zhao, C., Xu, J., Hu, W., Ji, J., Xu, H., & Liu, G. L. (2021). One-step rapid quantification of SARS-CoV-2 virus particles via low-cost nanoplasmonic sensors in generic microplate reader and point-of-care device. *Biosensors and Bioelectronics*, 171, 112685. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112685>
- International Organization for Standardization. (2014). *Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management - Part 1: Overview, concepts and terminology*.
- Isermann, R. (2011). *Fault-Diagnosis Applications*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12767-0>
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.09.012>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2021). Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*, 2, 100110. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100110>
- Kardec, A., & Lafraia, J. R. B. (2002). *Manutenção: Gestão Estratégica e Confiabilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora: ABRAMAN.
- Kardec, A., & Nascif, J. (2012). *Manutenção - Função Estratégica* (4ª edição). Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Kerzner, H. (2011). *Project Management Metrics, KPIs, and Dashboards*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118086254>
- Kobbacy, K. A. H., & Murthy, D. N. P. (2008). *Complex System Maintenance Handbook*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7>

- Lee, D., & Choi, D. (2020). Analysis of the reliability of a starter-generator using a dynamic Bayesian network. *Reliability Engineering and System Safety*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106628>
- Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., & Lin, J. (2018). Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 799–834. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.11.016>
- Levitt, J. (2003). *Complete guide to preventive and predictive maintenance* (First edition). NY: Industrial Press Inc.
- Li, J., Zhang, Z., Wang, X., & Yan, W. (2022). Intelligent decision-making model in preventive maintenance of asphalt pavement based on PSO-GRU neural network. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101525. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101525>
- Liu, H.-C. (2016). FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods. In *FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods* (pp. 13–27). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1466-6_2
- Lughofer, E., & Sayed-Mouchaweh, M. (2019). *Predictive Maintenance in Dynamic Systems*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05645-2>
- Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., & Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>
- M. Smith, A., & Hinchcliffe, G. (2003). *RCM - Gateway to World Class Maintenance* (1a edição). Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Marinho, P., Pimentel, D., Casais, R., Silva, F., Carlos Sá, J., & Pinto Ferreira, L. (2021). Selecting the best tools and framework to evaluate equipment malfunctions and improve the OEE in the cork industry. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(4), 286–298. <https://doi.org/10.24867/IJIEEM-2021-4-295>
- Márquez, A. C. (2007). *The Maintenance Management Framework*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-821-0>
- Márquez, A. C., de León, P. M., Fernández, J. F. G., Márquez, C. P., & Campos, M. L. (2009). The maintenance management framework: A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(2), 167–178. <https://doi.org/10.1108/13552510910961110>
- Mechefske, C. (2005). *Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics* (pp. 25-1-25–35). <https://doi.org/10.1201/9781420039894.ch25>

- Melani, A. H. A., Murad, C. A., Caminada Netto, A., Souza, G. F. M. de, & Nabeta, S. I. (2018). Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant. *Energy*, *147*, 767–781. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.048>
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Elsevier Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7531-4.X5000-3>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centred Maintenance* (2ª edição). Butterworth-Heinemann.
- NP EN 13306:2017 - Manutenção - Terminologia da Manutenção. (2017). *Instituto Português da Qualidade*.
- Oliveira, M. A. de. (2017). *Sistema de gestão da manutenção baseada no grau de maturidade da organização no âmbito da manutenção* [Tese de Doutoramento]. Universidade do Minho - Escola de Engenharia.
- Orhan, S., Aktürk, N., & Çelik, V. (2006). Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies. *NDT and E International*, *39*(4), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.08.008>
- Paolanti, M., Romeo, L., Felicetti, A., Mancini, A., Frontoni, E., & Loncarski, J. (2018). Machine Learning approach for Predictive Maintenance in Industry 4.0. *2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MESA.2018.8449150>
- Parmenter, D. (2015). *Key Performance Indicators*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119019855>
- Pereira, M. J. (2009). *Engenharia de Manutenção - Teoria e Prática*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda.
- Piccarozzi, M., Silvestri, C., Aquilani, B., & Cagnetti, C. (2021). Industry 4.0 tools in innovative European firms: Exploring their adoption and communication features through content analysis. *Procedia Computer Science*, *180*, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.257>
- Pinto, J. P. (2013). *Manutenção Lean*. Lidel.
- Qian, L., Durairaj, S., Prins, S., & Chen, A. (2021). Nanomaterial-based electrochemical sensors and biosensors for the detection of pharmaceutical compounds. *Biosensors and Bioelectronics*, *175*, 112836. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112836>
- Rahmati, S. H. A., Ahmadi, A., & Karimi, B. (2018). Multi-objective evolutionary simulation based optimization mechanism for a novel stochastic reliability centered maintenance problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, *40*, 255–271. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.02.010>

- Ramos, P. G. D. (2012). *Organização e Gestão da Manutenção Industrial - Aplicação Teórico-prática às Fabricas Lusitana – Produtos Alimentares, S.A.* [Tese de Mestrado]. Universidade da Beira Interior.
- Sahba, R., Radfar, R., Rajabzadeh Ghatari, A., & Pour Ebrahimi, A. (2021). Development of Industry 4.0 predictive maintenance architecture for broadcasting chain. *Advanced Engineering Informatics*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101324>
- Sarazin, A., Bascans, J., Sciau, J. B., Song, J., Supiot, B., Montarnal, A., Lorca, X., & Truptil, S. (2021). Expert system dedicated to condition-based maintenance based on a knowledge graph approach: Application to an aeronautic system. *Expert Systems with Applications*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115767>
- Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6275-8.X5000-0>
- Simões, J. M., Gomes, C. F., & Yasin, M. M. (2016). Changing role of maintenance in business organisations: measurement versus strategic orientation. *International Journal of Production Research*, 54(11), 3329–3346. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1106611>
- Smith, R., & Hawkins, B. (2004). *Lean Maintenance - Reduce Costs, Improve Quality, and Increase Market Share* (1ª edição). Elsevier Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7779-0.X5000-6>
- Teixeira, H. N., Lopes, I., & Braga, A. C. (2020). Condition-based maintenance implementation: A literature review. *Procedia Manufacturing*, 51, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.033>
- Villarini, M., Cesarotti, V., Alfonsi, L., & Introna, V. (2017). Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data. *Energy Conversion and Management*, 152, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.090>
- Vu, H. C., Grall, A., Fouladirad, M., & Huynh, K. T. (2021). A predictive maintenance policy considering the market price volatility for deteriorating systems. *Computers and Industrial Engineering*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107686>
- World Pumps. (2020). *Liquid ring vacuum pump considerations*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(20\)30243-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0262-1762(20)30243-1)
- Yavuz, O., Doğan, E., Carus, E., & Görgülü, A. (2019). Reliability Centered Maintenance Practices in Food Industry. *Procedia Computer Science*, 158, 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.046>
- Yssaad, B., Khiat, M., & Chaker, A. (2014). Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 55, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.08.025>

- Zakikhani, K., Nasiri, F., & Zayed, T. (2020). Availability-based reliability-centered maintenance planning for gas transmission pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104105>
- Zhang, Y., Li, J., Kang, J., & Zhou, F. (2021). Experimental study on the flow and heat transfer behavior of polymer solutions in the closed liquid ring vacuum pump system. *Applied Thermal Engineering*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117525>
- Zhu, L., Johnsson, C., Varisco, M., & Schiraldi, M. M. (2018). Key performance indicators for manufacturing operations management – gap analysis between process industrial needs and ISO 22400 standard. *Procedia Manufacturing*, 25, 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.060>
- Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>