



DIOGO FRANCISCO LOPES MOTA

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

MELHORIA DA GESTÃO DA MANUTENÇÃO DE UMA FÁBRICA DE PALHINHAS DE PAPEL

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA E GESTÃO INDUSTRIAL

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2023

MELHORIA DA GESTÃO DA MANUTENÇÃO DE UMA FÁBRICA DE PALHINHAS DE PAPEL

DIOGO FRANCISCO LOPES MOTA

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

Orientadora: Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas
Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,
Professora Associada da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade NOVA de Lisboa.

Arguente: Doutor José Augusto da Silva Sobral,
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa do
Instituto Politécnico de Lisboa

Orientadora: Doutora Helena Víctorovna Guitiss Navas,
Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universi-
dade NOVA de Lisboa.

Melhoria da Gestão da Manutenção de uma Fábrica de Palhinhas de Papel

Copyright © Diogo Francisco Lopes Mota, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar por agradecer à direção da Tetra Pak Tubex Portugal pela oportunidade concebida de realização do presente estudo.

À Professora Doutora Helena Navas, por todo o apoio e orientação disponibilizada durante as diversas fases de desenvolvimento da dissertação.

À Engenheira Sofia Terrão, supervisora do estágio dentro da Tetra Pak Tubex Portugal, com quem tive o prazer de trabalhar e que se mostrou sempre disponível para esclarecer todas as minhas dúvidas.

A todos os meus colegas de curso, por todo o apoio e espírito de entreajuda proporcionado ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus pais e irmã, por me terem ajudado a alcançar todos os meus objetivos.

Por último, um grande agradecimento à minha família pela insistência necessária e por todo o apoio durante a execução deste projeto.

RESUMO

A manutenção desempenha um papel fundamental dentro de qualquer organização que pretenda manter os seus ativos em boas condições de funcionamento e responder a cada um dos problemas detetados, através da implementação de ações de reparação e melhoria.

O presente estudo foi realizado na Tetra Pak Tubex Portugal, uma fábrica especializada na produção de palhinhas de papel. A fábrica objeto de estudo, recentemente transacionou a sua produção de palhinhas de plástico para palhinhas de papel, devido a uma diretiva aprovada pelo Parlamento Europeu, que criou problemas relacionados com a fiabilidade dos sistemas de produção, havendo uma necessidade de melhorar as atividades de gestão da manutenção praticadas na fábrica.

Este estudo tem como objetivo identificar as principais causas das falhas da linha de produção, efetuar uma análise da fiabilidade do equipamento considerado como ponto crítico e propor um conjunto de ações de melhoria relacionadas com as atividades de gestão de manutenção na fábrica.

Com base nas observações realizadas durante o estudo, foram desenvolvidas um conjunto de propostas de melhoria a serem implementadas na linha de produção. Foi sugerido à organização reforçar o horário dos técnicos de manutenção para aumentar a sua disponibilidade, implementar um sistema para monitorizar KPIs global a toda a produção, criar uma matriz de risco para priorizar as atividades de manutenção e estabelecer um conjunto de regras a seguir em caso de falha.

No caso de implementação integral, é previsto uma diminuição de 17% do número de interrupções da linha de produção, aumento de 50% da disponibilidade dos técnicos de manutenção e poupar em 16 horas por mês de um dos trabalhadores.

O desenvolvimento do estudo foi auxiliado por observação direta, análise de documentos internos, análise dos principais KPIs de controlo do desempenho de produção, diagrama de Pareto, teste de Laplace, brainstorming, entre outros.

Palavras chave: Gestão da Manutenção, Fiabilidade, Disponibilidade Operacional, Rendimento, Sistema Reparável e MTBF.

ABSTRACT

Maintenance plays a fundamental role within any organization that wants to keep its assets in good working order and respond to each problem detected by implementing repair and improvement actions.

This study was carried out at Tetra Pak Tubex Portugal, a factory that specializes in the production of paper straws. The factory under study has recently switched its production from plastic straws to paper straws, due to a directive approved by the European Parliament, which has created problems related to the reliability of production systems, resulting in a need to improve the maintenance management activities practiced at the factory.

The aim of this study is to identify the main causes of production line failures, carry out a reliability analysis of the equipment considered to be the critical point and propose a set of improvement actions related to the factory's maintenance management activities.

Based on the observations made during the study, a set of improvement proposals were developed to be implemented on the production line. It was suggested that the organization reinforce maintenance technician's hours to increase their availability, implement a system to monitor global KPIs for all production, create a risk matrix to prioritize maintenance activities and establish a set of rules to follow in the event of a failure.

In the case of full implementation, it is expected that there will be a 17% reduction in the number of interruptions to the production line, a 50% increase in the availability of maintenance technicians and a saving of 16 hours per month for one of the workers.

The development of the study was aided by direct observation, analysis of internal documents, analysis of the main production performance control KPIs, Pareto diagram, Laplace test, brainstorming, among others.

Keywords: Maintenance Management, Reliability, Operational Availability, Performance, Repairable System and MTBF.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do estudo	2
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos do estudo.....	4
1.4	Metodologia do estudo.....	5
1.5	Estrutura da dissertação	6
2	MANUTENÇÃO INDUSTRIAL E FIABILIDADE	7
2.1	Manutenção	7
2.1.1	Definição de manutenção.....	9
2.1.2	Evolução histórica da manutenção	10
2.1.3	Gestão da Manutenção.....	13
2.1.4	Modelos de organização dos serviços de manutenção	17
2.1.5	Tipos de manutenção.....	18
2.1.6	Indicadores de desempenho	20
2.2	Testes estatísticos da fiabilidade.....	25
2.3	Sistemas reparáveis	30
3	ESTUDO DE CASO.....	35
3.1	Apresentação da empresa	35
3.1.1	Grupo Tetra Pak.....	35
3.1.2	Tetra Pak Tubex Portugal.....	38

3.2	Caracterização do processo de produção e gestão de manutenção na fábrica.....	40
3.2.1	Caracterização do processo de fabrico.....	41
3.2.2	Gestão de manutenção atualmente praticada na fábrica.....	46
3.3	Identificação de problemas.....	49
3.3.1	Análise das interrupções ocorridas na linha de produção	51
3.3.2	Análise da fiabilidade: Sistema reparável.....	58
3.4	Propostas de melhoria	66
3.5	Discussão de resultados	71
4	CONCLUSÕES	74
4.1	Conclusões gerais	74
4.2	Sugestões para trabalhos futuros	76
	BIBLIOGRAFIA.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ford Modelo T.....	11
Figura 2.2 - Evolução da manutenção industrial.....	12
Figura 2.3 - Pilares do TPM.....	14
Figura 2.4 - Tipos de Manutenção.....	19
Figura 2.5 - Curva da Banheira.....	28
Figura 2.6 - Componentes que fazem parte de um carro.....	31
Figura 2.7 - Curva normal reduzida.....	33
Figura 3.1 - Tipos de produtos produzidos pela Tetra Pak.....	36
Figura 3.2 - Estrutura organizacional da Tetra Pak.....	37
Figura 3.3 - Fábrica Tetra Pak Tubex Portugal.....	38
Figura 3.4 - Palhinha flexível e palhinha reta.....	39
Figura 3.5 - Diagrama do processo de fabrico da palhinha flexível.....	41
Figura 3.6 - Máquina responsável pela formação dos tubos de papel.....	42
Figura 3.7 - Carrinhos de transporte a receber os tubos de papel.....	43
Figura 3.8 - Equipamento para testar a perda de ar dos tubos de papel.....	44
Figura 3.9 - Máquina de corte e dobragem em forma de U.....	44
Figura 3.10 - Máquina de inspeção de qualidade das palhinhas.....	45
Figura 3.11 - Colocação das palhinhas embaladas numa caixa de cartão.....	46
Figura 3.12 - Organização do departamento de manutenção da Tetra Pak Tubex Portugal....	46
Figura 3.13 - Local da máquina onde é realizada manutenção preventiva.....	47
Figura 3.14 - Etiqueta de manutenção.....	48
Figura 3.15 - Número acumulado de falhas durante o período em estudo.....	60
Figura 3.16 - Diagrama de Pareto do número de falhas da máquina em análise.....	63
Figura 3.17 - Diagrama de Pareto do tempo total de interrupção das falhas.....	65

Figura 3.18 - Matriz de riscos.....	67
Figura 3.19 - Representação ilustrativa do sistema de registo de falhas global.....	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Disponibilidade e número de equipamentos em cada zona de trabalho.....	51
Tabela 3.2 - Interrupções do equipamento de formação do tubo de papel.....	52
Tabela 3.3 - Tempos de paragem da linha laranja.....	53
Tabela 3.4 - Cálculo do TR e TF para cada mês	54
Tabela 3.5 - Número de palhinhas produzidas durante o período em análise.....	56
Tabela 3.6 - Parâmetros utilizados para o cálculo do teste de Laplace.....	59
Tabela 3.7 - Frequência de interrupções da máquina de formação de tubos.	62
Tabela 3.8 - Duração das interrupções da máquina de formação de tubos.....	64

SIGLAS

KPI	<i>Key Performance Indicators.</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures.</i>
MTTF	<i>Mean Time to Failure.</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair.</i>
NPB	Número de Peças Boas Fabricadas.
NPR	Número de Peças Realizadas.
NPTR	Número de Peças Teoricamente Realizáveis no tempo requerido.
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.
PPH	Processo de Poisson Homogéneo.
PPNH	Processo de Poisson Não Homogéneo.
TBF	<i>Time Between Failures.</i>
TF	Tempo de Funcionamento.
TNR	Tempo Não Requerido.
TPI	Tempo de Paragens Induzidas.
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TPP	Tempo de Paragens Próprias.
TR	Tempo Requerido.
TT	Tempo Total.

USB *Universal Serial Bus.*

WIP *Work in Progress.*

SÍMBOLOS

Di	Disponibilidade induzida.
Do	Disponibilidade operacional.
Dp	Disponibilidade própria.
H_0	Hipótese nula.
H_1	Hipótese alternativa
Ii	Indisponibilidade induzida.
Ip	Indisponibilidade própria.
N	Número de falhas ocorridas no período em análise.
n_f	Número de falhas.
Po	Produtividade operacional.
Pp	Produtividade própria.
Ro	Rendimento operacional.
Rv	Rendimento velocidade.
T	Tempo total de funcionamento.
Tcm	Tempo de ciclo real médio.
$Tcth$	Tempo de ciclo teórico.
t_i	Tempo de vida do sistema no momento da falha de ordem i .
Tq	Taxa de qualidade.
Z_0	Estatística de teste.
α	Nível de significância.
Δt	Período de tempo.
θ_i	MTBF mínimo.
λ	Taxa de falhas.

INTRODUÇÃO

Atualmente, devido à crescente globalização dos mercados e um ambiente cada vez mais competitivo entre empresas, tornou-se necessário para as organizações fazer um ajuste da sua postura dentro das áreas de negócio em que operam, de modo a diferenciarem-se dos seus concorrentes.

A concorrência criada pelas diferentes organizações, juntamente com a pressão para melhorar o serviço prestado a cada cliente, levou as empresas a procurar soluções capazes de melhorar a qualidade dos seus serviços e a aumentar a produtividade dos seus processos. Uma das soluções adotadas pelas organizações foi o investimento na melhoria da gestão da manutenção praticada nos sistemas de produção, bem como o aumento da preocupação no controlo da fiabilidade dos equipamentos.

Na visão atual, a manutenção não se limita apenas a um conjunto de ações de reparação de equipamentos, mas também a técnicas de prevenção de falhas. Nos dias de hoje, o avanço tecnológico atual já permite controlar o nível de desgaste das peças de um equipamento ao instalar sensores nos locais críticos da máquina, permitindo assim, monitorizar os indicadores chave de desempenho de forma a prever o acontecimento de futuras falhas. Este tipo de monitorização permite que os técnicos de manutenção possam atuar preventivamente, antes que quaisquer falhas ocorram (Hashemian, 2011). Em consequência destes avanços, as empresas começaram a implementar medidas capazes de melhorar a sua gestão da manutenção.

A manutenção é praticada pelas organizações com o objetivo de manter os seus equipamentos em condições de funcionamento seguras, de forma a poder reduzir os custos associados às paragens de produção. Consequentemente, o departamento de manutenção é responsável por monitorizar as falhas que ocorrem em cada máquina, ao diagnosticar a

causa raiz de cada problema detetado para uma posterior implementação de ações de reparação da falha, a fim de garantir que o equipamento fique em condições seguras para voltar a ser utilizado (Triska *et al.*, 2021).

Durante o tempo de vida útil dos equipamentos, é inevitável existir um certo nível de desgaste e, a longo prazo, o acumular deste desgaste pode resultar em falhas que afetam a produção. Dependendo do tipo de sistema de produção e da dimensão da falha, o impacto da falha pode variar, podem ser criadas alterações do produto, insegurança do equipamento, redução do desempenho da produção ou até mesmo forçar a interrupção da produção.

Uma organização ao criar um plano de gestão da manutenção consegue obter vantagens no planeamento da sua produção, ao melhorar o cumprimento dos prazos de entrega aos clientes, uma vez que há uma diminuição na ocorrência de perdas de tempo devido a paragens, tornando os níveis de produção mais previsíveis.

Face ao exposto, a manutenção quando aplicada de forma correta consegue ter um impacto positivo na produção, tornando possível à organização melhorar as condições de fabrico dos seus produtos, reduzindo o número de paragens devido a falhas em cada um dos seus equipamentos.

Paralelamente, o estudo da fiabilidade dos equipamentos é essencial para o desempenho das organizações. A fiabilidade tem como objetivo investigar e desenvolver métodos capazes de criar sistemas fiáveis, através da compreensão das razões de falha dos equipamentos para poder melhorar os processos de manutenção (Liu *et al.*, 2022).

1.1 Enquadramento do estudo

Nas últimas décadas, o consumo de plástico tem vindo a aumentar de forma considerável, tornando a sociedade dependente dos plásticos tradicionais que derivam de combustíveis fósseis. Anualmente, em todo o mundo são produzidas, em média, cerca de 360 milhões de toneladas de plástico, sendo uma das suas principais utilizações o fabrico de embalagens de plástico (Montoille *et al.*, 2021).

Devido aos atuais níveis de poluição de plástico no planeta, a preocupação com o ambiente a nível global tem vindo a aumentar. Como resultado, têm surgido cada vez mais novas diretrizes de proteção ambiental que visam reduzir a poluição causada pelas organizações e os seus produtos no planeta.

O presente estudo foi realizado na empresa Tetra Pak Tubex Portugal, um dos principais fabricantes de palhinhas de papel pertencentes ao grupo Tetra Pak. Em 2019, o

Parlamento Europeu aprovou uma nova diretriz que proíbe a venda de utensílios de plástico de utilização única a partir de 2021, causando mudanças significativas na indústria de embalagem de alimentos, setor industrial na qual a Tetra Pak Tubex Portugal se insere (Fanini & Guittard, 2021).

A Tetra Pak Tubex Portugal, ao ser afetada por este conjunto de medidas para combater a poluição do planeta, teve de adaptar os seus equipamentos para deixar de produzir palhinhas de plástico e passar a produzir palhinhas de papel.

A mudança repentina dos equipamentos não permitiu um desenvolvimento de equipamentos para o novo tipo de produção com um grande nível de fiabilidade. Deste modo, a Tetra Pak Tubex Portugal pretende melhorar o nível de produtividade dos seus equipamentos, e assim, se manter relevante no mercado em relação aos seus concorrentes. Para isso, é necessário para a organização seguir as tendências do mercado, de forma a acompanhar os novos desenvolvimentos tecnológicos, a fim de satisfazer as necessidades dos clientes e cumprir novos regulamentos que possam surgir (Formentini *et al.*, 2021).

1.2 Motivação

A nova diretriz aprovada pelo Parlamento Europeu sobre a venda de utensílios de plástico de utilização única obrigou as organizações inseridas na indústria de embalagens alimentares a alterar a matéria-prima de alguns dos seus produtos (Neto *et al.*, 2021). Como resultado, as empresas iniciaram um processo de reformulação dos seus sistemas de produção para cumprir os novos requisitos impostos, neste caso, a substituição da matéria-prima do plástico para o papel em todos os seus produtos abrangidos pela nova diretriz.

A mudança provocou um aumento da concorrência entre as empresas afetadas por esta nova diretiva, criando uma corrida para desenvolver novos sistemas de produção capazes de satisfazer as necessidades dos clientes sem perder a qualidade do produto. Após as atualizações dos sistemas de produção, verificou-se um aumento do número de interrupções no processo devido a problemas nos novos equipamentos, assim como um aumento no número de palhinhas produzidas não conformes.

Com o intuito de manter a sua relevância no mercado, a Tetra Pak Tubex Portugal reconheceu a importância de analisar os seus sistemas de produção que tinham sido recentemente atualizados, de modo a encontrar ações de melhoria nas máquinas e estudar os comportamentos das falhas.

1.3 Objetivos do estudo

Perante as novas regras aprovadas pelo Parlamento Europeu relativamente à venda de utensílios de plástico de utilização única, surgiu a necessidade de se realizar um estudo sobre a gestão da manutenção praticada na fábrica e de elaborar um estudo de fiabilidade da máquina considerada como ponto crítico de uma das linhas de produção da fábrica.

O presente estudo, tem como objetivo principal identificar as principais causas de falha do equipamento identificado como ponto crítico e melhorar as atividades de gestão da manutenção praticadas na fábrica.

Foi proposto à fábrica Tetra Pak Tubex Portugal, o desenvolvimento de um estudo do desempenho da sua linha de produção "Linha laranja" e a análise da fiabilidade de um dos seus equipamentos, neste caso a máquina responsável pela formação do tubo de papel que mais tarde se transforma numa palhinha.

Deste modo, têm-se como objetivo caracterizar o processo de fabrico, com identificação dos diferentes produtos e as suas especificações, descrição de cada etapa do processo e análise da gestão de manutenção atualmente praticada na fábrica. Durante a análise de cada equipamento, procura-se encontrar o equipamento considerado como ponto crítico de toda a linha de produção.

Ao longo da análise da linha de produção, pretende-se encontrar os diferentes tipos de interrupções do sistema produtivo, definir a gravidade de cada motivo de falha e determinar os principais indicadores de desempenho para conseguir tirar conclusões sobre a capacidade produtiva da linha em estudo.

Os testes estatísticos da fiabilidade tem como objetivo refletir sobre a fiabilidade do equipamento definido como ponto crítico, com o intuito de identificar as suas principais falhas, determinar a frequência de paragens e obter o MTBF mínimo do sistema, de forma a determinar o tempo previsto entre interrupções.

Por último, com base nas razões de falha identificadas e nos problemas encontrados nas atividades de gestão da manutenção praticada, tenciona-se elaborar um conjunto de propostas de melhoria de forma a diminuir, ou até mesmo solucionar, os problemas identificados ao longo do estudo. Com a ajuda das ações de melhoria propostas neste estudo, espera-se compreender as principais causas de falha e fornecer sugestões para reduzir o número de interrupções da linha, e em consequência, aumentar a sua produtividade.

1.4 Metodologia do estudo

A metodologia utilizada durante o estudo baseou-se nas técnicas e ferramentas da gestão da manutenção e de fiabilidade para atingir os objetivos previamente definidos.

Inicialmente, foram recolhidos todos os dados e informações necessárias para o desenvolvimento do estudo. Com a colaboração do chefe de turno e dos operadores da linha em análise, foi feito um diagnóstico inicial para identificar as diferentes áreas de trabalho que participam no fabrico da palhinha de papel. O diagnóstico inicial permitiu a observação de cada estação de trabalho, máquinas, mudança de turnos, limpeza do espaço, organização e o conjunto de procedimentos de resolução de problemas em caso de falha.

Para proceder à identificação de problemas foram acompanhados vários turnos de produção de forma a identificar o ponto crítico da linha de produção. Para a linha objeto de estudo, foram listados os diferentes tipos de interrupção que afetam a produção, assim como a sua respetiva duração, o que permitiu o cálculo dos tempos associados a paragens de forma a elaborar uma análise do desempenho da linha de produção. O conjunto de informações sobre os tempos de paragem permitiu obter o rendimento operacional da linha em análise.

Na etapa seguinte do estudo houve uma reflexão sobre a fiabilidade do equipamento identificado com ponto crítico. De forma a descobrir a tendência dos tempos entre falhas, recorreu-se ao teste de Laplace, com o objetivo de descobrir se a taxa de falhas é constante ou apresenta alguma tendência. Para uma melhor interpretação do resultado do teste de Laplace, procedeu-se à construção de um gráfico com um ajuste a uma reta do número acumulado de falhas em função do tempo de vida do sistema no momento de ocorrência da falha. Dada a tendência identificada, foi calculado o tempo previsto entre interrupções do processo de fabrico.

As principais causas de interrupção do equipamento em análise permitiram formular um conjunto de propostas de melhoria, com o intuito de resolver os problemas identificados.

Os dados históricos utilizados para realizar os testes de análise estatística sobre a fiabilidade e gestão da manutenção foram recolhidos do sistema de base de dados interno de cada máquina que pertence à linha de produção em análise. O período considerado para o estudo foi de 01/04/2022 a 31/07/2022.

1.5 Estrutura da dissertação

O presente documento está dividido em quatro capítulos.

No primeiro capítulo, é feita a contextualização do problema, uma descrição das recentes mudanças no setor da indústria em que a empresa se encontra, e a situação atual da linha de produção em estudo. Adicionalmente, são expressos os benefícios da manutenção para empresas deste tipo e expostos os objetivos a serem alcançados ao longo do estudo, apresentadas as metodologias utilizadas e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica que serve de base científica para o estudo. Este capítulo demonstra a importância de ter boas práticas na gestão da manutenção e a utilidade de realizar um estudo de fiabilidade em sistemas reparáveis.

No terceiro capítulo, o estudo de caso é retratado com uma apresentação da empresa na qual o estudo foi realizado, bem como uma descrição das suas atividades e produtos, uma análise do desempenho da linha de produção e descrição da gestão de manutenção praticada atualmente na fábrica. Posteriormente, foi realizada uma análise estatística do equipamento definido como ponto crítico da linha de produção, onde foram analisadas as origens e gravidade das suas falhas. Ainda neste capítulo, foram feitas propostas de melhoria e discussão dos resultados.

Por fim, o quarto capítulo apresenta as conclusões, bem como sugestões para o desenvolvimento de trabalho futuros.

A bibliografia contém as referências bibliográficas utilizadas ao longo do documento.

MANUTENÇÃO INDUSTRIAL E FIABILIDADE

A manutenção industrial e fiabilidade são dois temas que uma organização deve ter em consideração para assegurar o bom funcionamento dos seus sistemas de produção. Para resistir à competitividade presente na indústria, uma organização deve investir na melhoria do desempenho em ambos os domínios, adotando abordagens que aumentem a eficiência e produtividade dos seus processos. (Song *et al.*, 2023). Neste sentido, o presente capítulo tem como objetivo fornecer uma revisão exaustiva da literatura, incluindo conhecimentos, conceitos e ferramentas utilizados na gestão da manutenção e na análise da fiabilidade em sistemas de produção, e assim, permitir uma compreensão mais profunda dos conceitos-chave explorados ao longo do estudo.

2.1 Manutenção

A crescente concorrência no mercado exige que as organizações sejam cada vez mais eficientes e ágeis nos seus sistemas de produção, sem comprometer a qualidade dos produtos. Por conseguinte, a manutenção desempenha um papel fundamental ao assegurar a operacionalidade contínua dos equipamentos e sistemas de produção, reduzindo os tempos de paralisação e impulsionando a eficiência das operações (Ingemarsdotter *et al.*, 2021).

A área da manutenção tem passado por alterações significativas ao longo dos anos. Os avanços das tecnologias, em conjunto com o aumento do conhecimento científico, permitiram às organizações desenvolver novas técnicas neste setor. Este progresso tecnológico tem sido um grande impulsionador para a evolução da manutenção, permitindo a adoção de abordagens mais eficazes dentro das organizações.

A evolução do campo da manutenção, quando combinada com o aumento do nível de conhecimento dos profissionais responsáveis por esta área, resultou em melhorias significativas nas atividades de manutenção em diversas indústrias. Por conseguinte, as exigências do mercado forçaram as empresas a se organizar de maneira a contar com um departamento dedicado à gestão da manutenção, de modo a acompanhar os avanços tecnológicos e garantir a eficiência e confiabilidade de seus equipamentos.

Exemplos do progresso tecnológico incluem o uso de ferramentas de monitorização e análise de dados que permitem a identificação precoce de potenciais falhas e a implementação de ações corretivas antes que problemas mais graves ocorram (Daniyan *et al.*, 2022).

Relativamente à manutenção de sistemas de produção, é importante ter em conta que os equipamentos estão constantemente sujeitos ao aparecimento de falhas ao longo do seu tempo de vida. O efeito provocado pelas falhas que aparecem durante o funcionamento normal da produção pode ter um impacto significativo no funcionamento do equipamento. O efeito das falhas varia desde perdas mínimas até algo mais catastrófico, dependendo de vários fatores, como o custo de reparação do equipamento e o impacto no resto da linha de produção. Logo, é importante para as organizações ter a capacidade de corrigir as falhas nos seus equipamentos à medida que estes surgem, tal como praticar ações de manutenção para substituir peças que apresentem um nível de degradação elevado de modo a manter os equipamentos num estado de conservação adequado (Pinto *et al.*, 2020).

As falhas em equipamentos apresentam vários tipos de custos para a empresa. Existem três tipos de custos que estão associados a este problema: custos diretos, indiretos e custos de oportunidade. Os custos diretos incluem a recuperação de peças danificadas, reparações temporárias e a contratação temporária de funcionários qualificados para restaurar o equipamento de forma a voltar ao seu desempenho normal (Gonzalo *et al.*, 2022). Os custos indiretos incluem multas legais ou regulamentares, custos de mão-de-obra e horas extraordinárias. Já os custos de oportunidade correspondem a tempo e receita perdidos, sendo frequentemente intangíveis.

De forma a alcançar um maior nível de excelência nas atividades de manutenção devem ser criadas equipas dedicadas à manutenção. As equipas de manutenção devem ser altamente especializadas para operar nos equipamentos ao qual estão alocados, por isso têm um papel fundamental ao garantir que os equipamentos funcionam de maneira eficiente e confiável. Ao se concentrarem exclusivamente na manutenção, estas equipas podem dedicar

tempo e recursos à implementação de estratégias avançadas de manutenção (Korchagin *et al.*, 2022).

As organizações têm vindo a reconhecer a importância da manutenção, atribuindo-lhe um papel de destaque no contexto industrial. Segundo (Guizzi *et al.*, 2019), os departamentos de manutenção possuem uma missão crucial dentro das organizações, centrando-se nos seguintes pontos fundamentais:

- Prevenir ativamente o aparecimento de falhas nos equipamentos, através da implementação de estratégias de manutenção;
- Corrigir prontamente as falhas que eventualmente ocorram nos processos, por meio de intervenções corretivas ágeis e eficazes;
- Melhorar a produtividade e a qualidade dos sistemas de produção através da melhoria dos processos de manutenção;
- Minimizar o consumo de recursos, por meio de uma gestão inteligente dos materiais utilizados.

2.1.1 Definição de manutenção

A manutenção consiste em um conjunto de procedimentos e práticas destinados a garantir o funcionamento contínuo e eficiente dos equipamentos utilizados pelas empresas. As técnicas aplicadas aos equipamentos têm como objetivo melhorar os ciclos de vida desses equipamentos, para que estes possam assegurar as suas funções de forma eficaz (Korchagin *et al.*, 2022).

O departamento de manutenção desempenha um papel essencial numa organização, ao garantir a disponibilidade, fiabilidade e desempenho dos sistemas de produção, contribuindo para combater a competitividade e o sucesso da organização no mercado industrial.

As ações praticadas pelo departamento de manutenção durante a gestão da manutenção têm como objetivo combater a degradação e o desgaste das peças, a fim de reduzir a perda de eficiência dos equipamentos que compõem uma linha de produção. Por conseguinte, é possível reduzir a quantidade de custos associados a falhas que afetam a qualidade da produção ou até possam levar à interrupção da mesma, graças à adoção de práticas provenientes da gestão de manutenção ativa que permitem atuar nos equipamentos preventivamente antes que as falhas aconteçam (Sahli *et al.*, 2021).

2.1.2 Evolução histórica da manutenção

No início da história industrial, a manutenção era vista como uma atividade secundária e relativamente simples. A manutenção era utilizada de forma reativa, isto é, os equipamentos só recebiam manutenção quando aconteciam avarias que impediam de continuar a funcionar.

Entre os anos 60 a 80, a manutenção era limitada à lubrificação de peças e à alteração da mecânica dos equipamentos. Por outras palavras, as noções de prevenção de falhas e as técnicas de previsão de avarias eram reduzidas (Poór *et al.*, 2019). De modo a entender este *modus operandi*, é necessário compreender o contexto. O mundo industrial era muito diferente dos dias de hoje. Nesta altura, a indústria ainda estava no início do seu crescimento e as consequências da falta de manutenção eram menores em comparação com o cenário atual. As paragens podiam afetar a produtividade da fábrica, mas como o equipamento não estava integrado numa linha de produção contínua, existiam menos consequências (Groumpos, 2021).

Com a revolução industrial, a manutenção tornou-se mais relevante. No entanto, os novos desenvolvimentos tecnológicos começaram a criar adversidades. Um dos problemas que surgiu nesta altura, foi a tendência das caldeiras das máquinas a vapor para explodir e matar os trabalhadores nas proximidades (Alazemi *et al.*, 2019). Este problema levou à criação de técnicas para assegurar que as caldeiras estavam em condições seguras de trabalho, evitando ferimentos ou até mesmo a morte dos trabalhadores através da manutenção. Este problema, juntamente com outros existentes, aumentou progressivamente a consciência do valor da segurança no espaço de trabalho.

Assim, começaram os primeiros procedimentos de manutenção em combinação com as tecnologias mais avançadas da altura para cada equipamento. Graças a este esforço, os riscos de acidente foram reduzidos e foram estabelecidas práticas de acompanhamento dos equipamentos para evitar danos à força humana e prejuízos à fábrica. A evolução das tecnologias e a sensibilização sobre os riscos ligados à utilização de equipamentos levou à criação das primeiras normas. Na Europa, normas de manutenção industrial foram progressivamente implementadas a partir de 1979 e, posteriormente, em 1985, as normas AFNOR X60 e X60 000 foram introduzidas (Coulibaly *et al.*, 2001).

O setor da manutenção tornou-se num departamento essencial nas fábricas, o que levou à criação de centros de formação de técnicos em manutenção e à elaboração de exames para certificação de conhecimentos no decorrer dos anos 80. Com o aparecimento

de especialistas, começou a ser possível dar resposta a questões de manutenção e foi possível evoluir para um modelo mais seguro e eficiente (Groumpos, 2021).

À medida que o fabrico dos produtos se tornou mais complexo, devido ao aumento da variedade de produtos e à maior complexidade das cadeias de abastecimento, as avarias começaram a ter um impacto cada vez maior. Foi então que surgiu a ideia de prevenir as avarias nas máquinas antes que estas parassem de funcionar, dando origem à manutenção preventiva.

A empresa Ford, fundada por Henry Ford, utilizou este modelo nas suas fábricas e recomendou o seu uso para os carros fabricados. O Ford Modelo T (Figura 2.1), um dos carros produzidos pela Ford, foi um dos automóveis mais icónicos e revolucionários da indústria automobilística, tendo sido lançado pela primeira vez em 1908. No seu manual era aconselhada a inspeção frequente dos mecanismos que compunham o carro, refletindo a importância atribuída à manutenção preventiva como parte essencial da sua longevidade e desempenho (González-Crespo & Vazquez, 2017).

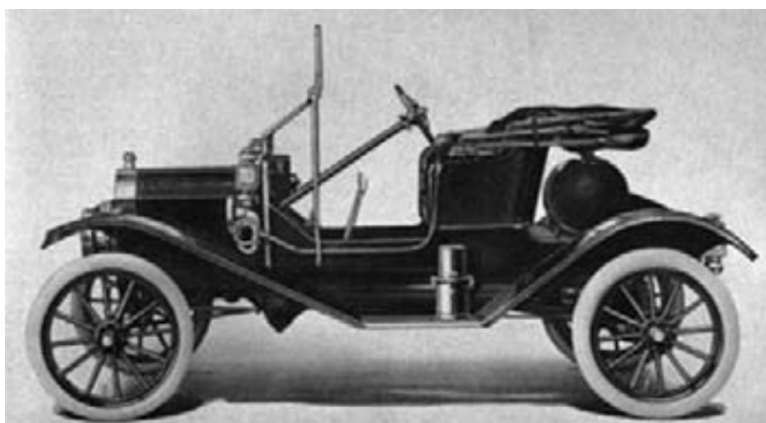


Figura 2.1 - Ford Modelo T.

(Alizon *et al.*, 2009)

A manutenção preventiva consome tempo ao fabricante, todavia, pode evitar atrasos na produção ou possíveis acidentes dentro da fábrica. Surge então, o desafio de como evitar a ocorrência de falhas. É utópico evitar o acontecimento de todas as falhas, para uma organização é mais exequível a prevenção de apenas os problemas com mais probabilidade de acontecer. Para isso, é necessário fazer uma análise dos sistemas de produção e perceber quais são os motivos de falha mais frequentes. Isto traz preocupações adicionais tais como que peças extras manter em stock para fazer substituições, com que frequência é necessário fazer manutenção num equipamento e como a fazer (Song *et al.*, 2023).

Após a Segunda Guerra Mundial, o conceito de manutenção produtiva chegou ao Japão. A manutenção produtiva tem o objetivo de minimizar as falhas e gargalos presentes num processo, propondo o acompanhamento da produtividade da fábrica como um todo. Este tipo de manutenção transformou-se na manutenção produtiva total, também conhecida por *Total Productive Maintenance* (TPM) em 1969. O principal impulsionador por trás deste movimento foi o Seichi Nakajima, que aprendeu sobre manutenção nos Estados Unidos da América e na Europa (Tortorella *et al.*, 2021).

A evolução do mundo industrial levou à globalização das indústrias de manufatura. A constante competição entre empresas impôs o investimento na melhoria das técnicas existentes, o que fez com que os conhecimentos de manutenção industrial evoluíssem com a chegada de novas abordagens. Entre 1980 e 2000, o progresso afetou múltiplos setores, como o da segurança, produção, qualidade, manutenção e comunicações. Estes avanços levaram à criação de várias normas, tais como as ISO 9000 em 1987 e as ISO 14000 em 1996 (Chaves & Campello, 2016).

Por fim, com a introdução da indústria 4.0, surgiu a manutenção preditiva que ajuda na previsão dos problemas antes de estes ocorram. Este tipo de manutenção baseia-se na recolha de dados através de algoritmos e inteligência artificial para procurar padrões de ocorrência de falhas e prever as avarias seguintes, permitindo a correção antes que estas ocorram. Este tipo de manutenção visa reduzir a manutenção excessiva no sistema produtivo, através de uma maior compreensão do modo de desgaste de cada máquina (Daniyan *et al.*, 2020).

Na Figura 2.2, é representado um gráfico que demonstra a evolução da Manutenção Industrial ao longo do tempo.

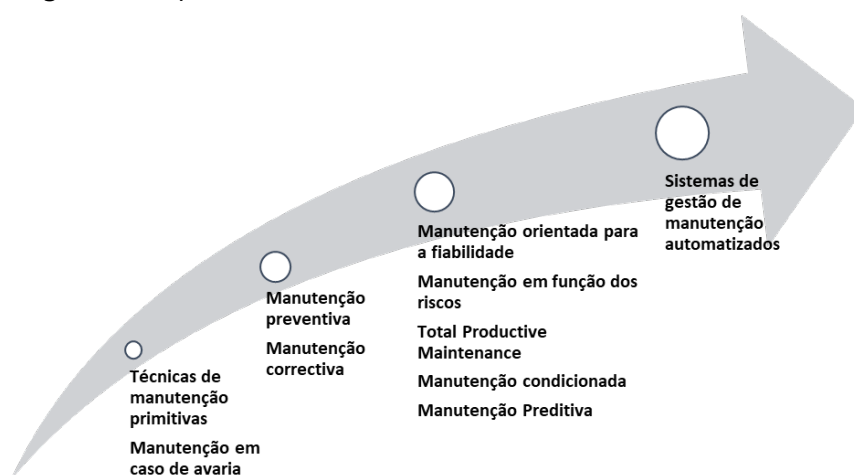


Figura 2.2 - Evolução da manutenção industrial.

Adaptado de (Errandonea *et al.*, 2022)

As empresas têm plena confiança nos progressos feitos até ao dia de hoje. Como é de esperar, os investimentos na melhoria das atividades de gestão da manutenção continuam ativos e as organizações esperam conseguir reduzir ainda mais o número de paragens na produção, enquanto aumentam a qualidade dos seus equipamentos.

2.1.3 Gestão da Manutenção

A gestão da manutenção define-se pelo processo de acompanhamento e gestão dos bens físicos e equipamentos de uma fábrica. Os principais objetivos da gestão da manutenção é criar atividades e estratégias relativas à manutenção para diminuir custos associados a atividades de manutenção, melhorar os ciclos de vida dos equipamentos e reduzir o número de falhas não planeadas nos equipamentos (Guizzi *et al.*, 2019).

Existem diversos custos que estão diretamente associados às atividades de manutenção. Por exemplo, quando uma organização faz uma compra de um equipamento, esta deve ter noção do dinheiro necessário para manter o equipamento num bom estado de funcionamento. As práticas convencionais não são tão eficientes, para isso deve ser feita uma análise de prevenção e minimização dos custos com auxílio do departamento de gestão da manutenção para aplicar diversas técnicas de análise estatística da fiabilidade (Dui *et al.*, 2023).

O tipo de indústria em que uma organização se insere, assim como a sua dimensão, tem efeito na estrutura do seu departamento de gestão da manutenção e no modo como este opera. Deste modo, as atividades de gestão da manutenção têm de se adaptar ao caso individual da fábrica, não existindo um modelo único seguido pelas empresas. O número de colaboradores que são alocados à equipa de manutenção é afetado pela dimensão da fábrica, pela quantidade de atividades relacionadas com a manutenção que são necessárias executar e pelo número total de trabalhadores (Salzano *et al.*, 2023).

Gestão da manutenção focada na fiabilidade

Na gestão da manutenção focada na fiabilidade, existe um foco na fiabilidade de cada equipamento e não apenas nas suas funcionalidades. Este tipo de gestão da manutenção assegura que todos os equipamentos estão prontos para realizar as ações para as quais foram concebidos no tempo disponível de produção da fábrica, ao fazer planos de manutenção personalizados para cada equipamento.

Deste modo, é possível melhorar a relação custo-benefício ao considerar a frequência das avarias no equipamento e a regularidade das paragens, com o objetivo de aumentar a sua disponibilidade para cumprir a sua função (Soares *et al.*, 2021).

Gestão da manutenção focada em TPM

A gestão da manutenção focada em TPM, ou Manutenção Produtiva Total, é uma estratégia de manutenção industrial utilizada para eliminar perdas e maximizar a eficiência, além de manter os equipamentos em boas condições de funcionamento, prevenindo falhas e melhorando o desempenho da linha de produção (Poór *et al.*, 2019).

Para implementar o TPM de forma eficaz, foram estabelecidos os 8 pilares do TPM (Figura 2.3), que guiam a sua implementação e desenvolvimento. Cada um destes pilares contribui para uma correta gestão da manutenção, ao adaptar-se às necessidades e particularidades de cada empresa (Singh *et al.*, 2013).

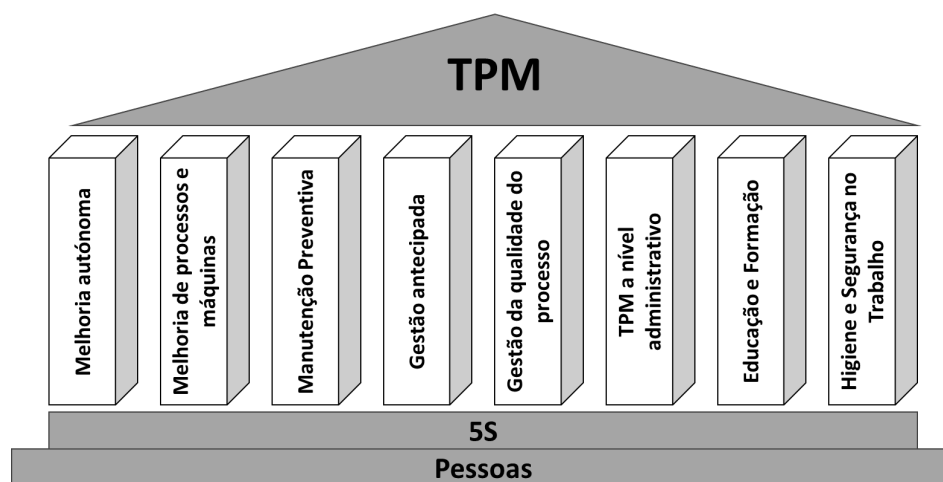


Figura 2.3 - Pilares do TPM.

Adaptado de (Haddad & Jaaron, 2012)

Na base do TPM estão todos os membros da hierarquia da fábrica, todos estes participam na aplicação do TPM, desde os cargos de chefia até aos operadores. É crucial compreender a importância da prevenção não apenas na manutenção, mas também em todas as atividades diárias e na resolução de problemas. Esta mentalidade deve ser aplicada em todos os níveis da organização, de forma a promover a melhoria contínua dos processos nas linhas de produção.

Numa organização que adota o TPM, os operadores são treinados para realizar tarefas de manutenção preventiva durante o seu turno, como por exemplo a limpeza, lubrificação e inspeção básica dos equipamentos. Esta abordagem envolve os trabalhadores na conservação dos equipamentos que utilizam, promovendo um senso de compromisso e responsabilidade. Desta forma, reduz-se a dependência da equipa de manutenção e consegue-se manter os equipamentos a operar de forma adequada (Pinto *et al.*, 2020).

O objetivo do TPM é reforçar a importância da prevenção não apenas na manutenção. Esta mentalidade deve ser aplicada em todos os níveis da organização, visando à melhoria contínua.

Os 8 pilares do TPM, conforme ilustrados na Figura 2.3, são os seguintes:

1. Melhoria autónoma;
2. Melhoria de processos e máquinas;
3. Manutenção Preventiva;
4. Gestão antecipada;
5. Gestão da qualidade do processo;
6. TPM a nível administrativo;
7. Educação e Formação;
8. Higiene e Segurança no Trabalho.

Um dos 8 pilares do TPM é a melhoria autónoma, este pilar incentiva os operadores e equipas de produção a adotarem uma postura mais proativa na manutenção dos equipamentos e na prevenção de problemas. Na melhoria autónoma os operadores são responsáveis pela limpeza e inspeção diária das áreas de trabalho, com o objetivo de manter os equipamentos em boas condições de funcionamento. Para o sucesso deste pilar, os operadores são formados de forma a conseguir realizar pequenas manutenções preventivas, efetuar limpezas regulares e identificar sinais de desgaste nas peças que compõem o equipamento. No caso de ser identificado um dano grave numa das máquinas, é crucial para os operadores saberem como comunicar corretamente o problema à equipa de manutenção. Por esta razão, a melhoria autónoma é essencial para o sucesso do TPM, pois permite a redução de paragens não planeadas, o aumento da vida útil dos equipamentos e a melhoria da qualidade dos produtos produzidos (Ahuja & Khamba, 2008).

O pilar de melhoria de processos e máquinas concentra-se em identificar e eliminar perdas que estão a reduzir o desempenho dos equipamentos. Através da melhoria dos processos e equipamentos, a equipa responsável por implementar a metodologia do TPM na

organização consegue identificar as causas raiz de problemas específicos num equipamento, desenvolvendo soluções eficazes para eliminá-los. Além disso, este pilar promove a implementação de medidas que previnem a ocorrência de falhas, evitando assim paragens de produção antes que estas aconteçam (Ahuja & Khamba, 2008). Para identificar e solucionar problemas, são disponibilizadas ferramentas e técnicas de análise de dados aos operadores.

A gestão antecipada tem como objetivo criar um sistema de gestão que permita antecipar as falhas antes que estas ocorram e afetem o desempenho do equipamento. Na gestão antecipada, são implementadas rotinas de inspeção para monitorizar os equipamentos e identificar possíveis problemas que podem vir a afetar a produção no futuro. Para controlar a produção, são utilizados indicadores de desempenho, é feita uma lista de *checklists* e uma análise dos dados históricos relativos a falhas. Por último, dentro do pilar da gestão antecipada, são também definidos os padrões de operação e manutenção para garantir um bom desempenho da organização, a integridade dos equipamentos e a segurança de todos os operadores (Ahuja & Khamba, 2008).

A gestão da qualidade do processo pretende garantir que os equipamentos são mantidos em boas condições de funcionamento, de modo a preservar a qualidade dos produtos e serviços. Este pilar tem como objetivo identificar e corrigir problemas que possam afetar a qualidade dos produtos e serviços, por meio da implementação de rotinas de inspeção e manutenção dos equipamentos. Estas rotinas verificam parâmetros específicos previamente definidos para controlar a calibração do equipamento e a manutenção das peças que compõem a máquina (Ahuja & Khamba, 2008). Este pilar estabelece os padrões de qualidade dos produtos, a fim de conseguir atender os requisitos dos clientes, levando em consideração o tipo de produto, o mercado alvo e as normas regulatórias.

O TPM a nível administrativo é um dos outros pilares do TPM. Este pilar está envolvido na implementação de boas práticas e políticas para melhorar a gestão dos recursos relacionados com a manutenção. Isso inclui o planeamento de produção, o controlo da quantidade de matérias-primas disponíveis e a utilização de tecnologias de informação para aumentar o desempenho dos processos. Este pilar é fundamental para o sucesso do TPM, pois permite melhorar os processos administrativos relacionados com a manutenção, garantindo a eficácia das atividades de manutenção e reduzir os custos associados a essas atividades. Além disso, é responsável pela comunicação entre as diferentes áreas que pertencem à organização, assim como melhorar a qualidade das informações transmitidas (Ahuja & Khamba, 2008).

O pilar da educação e formação visa desenvolver os conhecimentos de todas as pessoas envolvidas nas operações de manutenção dos equipamentos. A educação e formação são fundamentais para garantir a qualidade dos processos. Por isso, devem ser realizados programas de formação e qualificação para operadores, técnicos de manutenção e supervisores, com o objetivo de aprimorar as suas habilidades técnicas. Os programas de formação devem ir desde o nível mais básico até ao nível mais complexo. O treino especializado é importante para que os operadores saibam como operar e fazer a manutenção da máquina na qual executam as suas tarefas, incluindo técnicas de resolução de problemas e de melhoria contínua (Ahuja & Khamba, 2008).

Por último, o pilar da higiene e segurança no trabalho pretende garantir que as atividades realizadas dentro da empresa são realizadas com segurança, de forma saudável e sustentável, tanto para os colaboradores quanto para o meio ambiente. Neste pilar, são implementadas práticas e políticas para garantir a integridade física e a saúde dos colaboradores, levando em consideração a prevenção de acidentes e a minimização do impacto ambiental das atividades de produção da organização. Deste modo, a organização pode optar pelo uso de equipamentos de proteção individual, realizar formações, identificar os riscos presentes no local de trabalho e implementar medidas de proteção ambiental. Este pilar promove a cultura de segurança e a responsabilidade social dentro da organização (Ahuja & Khamba, 2008).

2.1.4 Modelos de organização dos serviços de manutenção

A gestão eficaz dos serviços de manutenção dentro de uma organização é necessária para garantir a fiabilidade e disponibilidade de cada um dos equipamentos. Para atender a este requisito, é importante adotar um modelo de organização dos serviços de manutenção adequado às características da empresa para facilitar uma execução eficiente das atividades de produção. São utilizados dois tipos de modelos para organizar os serviços de manutenção, a organização centralizada e descentralizada (Moutinho & Oliveira, 2015).

No modelo de organização centralizada, todas as atividades relacionadas com manutenção estão concentradas numa única equipa ou departamento dentro da organização. Este modelo, cria uma centralização que transfere toda a responsabilidade e autoridade pela gestão da manutenção a uma equipa especializada para executar todos os diferentes tipos de atividades relacionadas com a manutenção para garantir uma disponibilidade contínua de cada linha de produção (Moutinho & Oliveira, 2015). O modelo de organização dos serviços de manutenção centralizada promove a padronização dos

processos e procedimentos de manutenção, facilitando a consistência e uniformidade nas práticas adotadas.

Por outro lado, no modelo de serviços de manutenção descentralizada, ocorre uma distribuição das tarefas de manutenção entre os diferentes colaboradores e departamentos da organização. Neste modelo, cada departamento assume a responsabilidade de garantir a realização das tarefas de manutenção nos equipamentos que utilizam. Esta abordagem permite um acompanhamento mais próximo de cada máquina e facilita a comunicação entre os operadores e a equipa de manutenção, promovendo um maior entendimento das necessidades específicas de cada área de trabalho. Além disso, o modelo de organização dos serviços de manutenção descentralizada promove a responsabilidade local de cada operador, conferindo maior autonomia a cada um (Luxhøj *et al.*, 1997). Como resultado, é possível obter uma resposta mais rápida e adaptada à resolução de cada problema em específico, o que aumenta a eficiência na correção de falhas nos equipamentos.

A escolha do modelo de organização dos serviços de manutenção depende das características específicas da organização, bem como das suas necessidades. Cada modelo apresenta vantagens e desvantagens distintas que os diferenciam. A organização centralizada é mais adequada para organizações com um número variado de equipamentos, onde a padronização e coordenação das atividades de manutenção são essenciais. Por outro lado, a organização descentralizada é preferível para as organizações com várias unidades autónomas, que requerem uma manutenção mais especializada e adaptada a cada contexto de trabalho (Luxhøj *et al.*, 1997).

Neste sentido, a seleção do modelo de organização dos serviços de manutenção torna-se fundamental para um funcionamento eficaz e eficiente de uma organização, onde se pretende maximizar o desempenho dos equipamentos e minimizar o tempo de resposta a eventuais problemas. Portanto, a compreensão das particularidades e necessidades específicas da organização é determinante para a adoção da abordagem mais adequada em termos de gestão da manutenção.

2.1.5 Tipos de manutenção

Com o avanço contínuo das tecnologias, as técnicas de manutenção adaptaram-se e começaram a aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do tempo, resultando num conjunto diversificado de tipos de manutenção.

No contexto industrial, as empresas selecionam qual tipo de manutenção utilizar dependendo das suas necessidades específicas. Cada tipo de manutenção possui uma aplicação particular e um momento apropriado para ser executado. A manutenção pode ser classificada em duas categorias principais: manutenção planeada (manutenção preditiva, manutenção preventiva, manutenção de melhoria e manutenção corretiva) ou manutenção não planeada (manutenção corretiva) (Trojan & Marçal, 2017).

A Figura 2.4 apresenta uma ilustração com os diferentes tipos de manutenção.

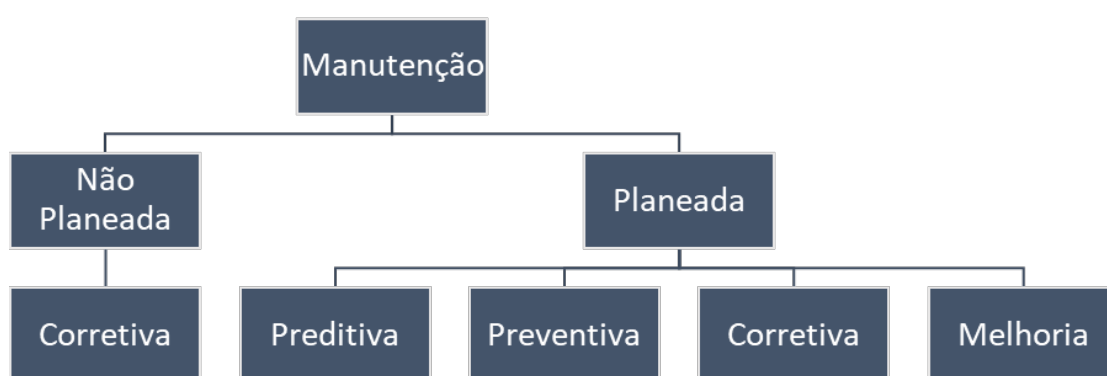


Figura 2.4 - Tipos de Manutenção.
Adaptado de (Trojan & Marçal, 2017)

A manutenção corretiva não planeada é um tipo de manutenção em que as atividades de manutenção corretivas têm como objetivo restaurar as funções do equipamento ou peça que falhou o mais rapidamente possível. A correção dos problemas ocorre apenas após uma paragem forçada da máquina ou quando a qualidade da produção é prejudicada, ou seja, quando a produção está abaixo dos padrões desejados, ou até mesmo quando a integridade da máquina ameaça a segurança dos trabalhadores. A manutenção corretiva apresenta um caráter de emergência, o que a torna mais dispendiosa e potencialmente perigosa quando comparada a outros tipos de manutenção.

Por outro lado, a manutenção corretiva planeada ocorre quando são detetadas alterações no desempenho de um equipamento, como quando existem alterações nos parâmetros chave de controlo do equipamento. Por outras palavras, a manutenção corretiva planeada acontece quando o equipamento apresenta falhas, mas ainda consegue continuar a funcionar, ao contrário da manutenção corretiva não planeada, que depois de ocorrer uma falha, a operação é completamente interrompida. O objetivo deste tipo de manutenção é

reparar as falhas da forma mais rápida, segura e económica possível, quando comparada ao que seria possível com a utilização da manutenção corretiva não planeada.

A manutenção preditiva, por sua vez, tem como objetivo monitorar as condições de funcionamento dos equipamentos em tempo real, através de *softwares* e equipamentos capazes de acompanhar o desempenho de cada máquina. Com base nas alterações dos parâmetros chave de desempenho, são tomadas decisões acerca do momento mais apropriado para realizar a manutenção (Daniyan *et al.*, 2020). Esta abordagem propõe a monitorização constante dos equipamentos que compõem a linha de produção, podendo ser aplicada a diversos tipos de máquinas. Contudo, a sua implementação exige investimentos por parte da organização, como por exemplo sensores, computadores e *softwares*.

A manutenção preventiva é um tipo de manutenção planeada, que se repete em intervalos de tempo definidos, com o intuito de reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas ou degradação das peças dos equipamentos (Song *et al.*, 2023). As tarefas de prevenção realizadas pelos técnicos de manutenção são executadas de forma periódica, acontecem antes de ocorrerem as falhas, com o propósito de garantir a eficácia dos equipamentos. O intervalo no qual ocorrem as tarefas preventivas é pré-determinado a partir do tempo de vida útil do equipamento, do histórico de problemas e nas horas diárias de uso (Sahli *et al.*, 2021).

Por fim, existe a manutenção planeada de melhoria, um tipo de manutenção proativa na melhoria de equipamentos. Neste tipo de manutenção, os operadores são responsáveis por identificar oportunidades de melhoria durante o seu turno de trabalho, para posteriormente os técnicos de manutenção poderem desenvolver soluções para implementar na linha de produção (Carvalho, 2019).

Apesar de existirem várias técnicas de manutenção, todas elas têm um objetivo comum. Independentemente da forma como a manutenção é aplicada, caracteriza-se por um conjunto de procedimentos realizados nos sistemas de produção, com o objetivo de assegurar que os equipamentos operem de forma eficiente e mantenham um estado de funcionamento adequado (Chen *et al.*, 2022).

2.1.6 Indicadores de desempenho

A análise do nível de desempenho de um sistema de produção, através do controlo de indicadores de desempenho, permite avaliar o comportamento de cada máquina. Ao criar alertas que são ativados quando existe uma alteração significativa de um dos indicadores chave de desempenho, é possível realizar melhorias nos equipamentos que terão impacto a

nível global na organização. Os benefícios podem incluir, por exemplo, a redução de custos, dos tempos de produção e dos riscos organizacionais (Fotovاتفard & Heravi, 2021).

A realização de tarefas de manutenção com base na análise de indicadores de desempenho permite um acompanhamento mais personalizado a cada máquina, identificando os tipos de problemas que costuma sofrer. Estes dados proporcionam ao departamento de manutenção uma visão clara das tarefas de manutenção a serem efetuadas, bem como permitem detalhar os objetivos da organização (Lambán *et al.*, 2022).

Os diferentes tempos relacionados com o desempenho de um sistema de produção são caracterizados por:

- **Tempo Total (TT)** - Corresponde ao período total considerado, tendo em conta o horário de funcionamento da fábrica, incluindo os horários de cada turno, o número de turnos diários e o número de dias de funcionamento semanal;
- **Tempo Não Requerido (TNR)** - É o tempo no qual não é previsto haver produção, este tempo pode corresponder, por exemplo, às pausas para almoço ou à realização de manutenção programada;
- **Tempo Requerido (TR)** - É o tempo dedicado à produção, no qual a máquina está disponível para funcionar;
- **Tempo de Funcionamento (TF)** - Corresponde ao tempo no qual a máquina está a produzir, independentemente da qualidade final do produto;
- **Tempo de Paragens Próprias (TPP)** - É o período em que o equipamento interrompe o seu funcionamento normal devido a causas ligadas aos seus meios de fabrico. Neste período, estão incluídos tempos de paragem por avarias, tempos de paragem para manutenção e tempos de paragem funcional que correspondem a paragens para controlo de qualidade, mudança de ferramentas e alteração do produto a ser fabricado;
- **Tempo de Paragens Induzidas (TPI)** - Tempo de paragens não programadas que interrompem a produção devido a fatores externos.

Disponibilidade operacional

A Disponibilidade operacional (*Do*) é um indicador útil quando se quer analisar tempos relacionados com o desempenho da produção. Quando um equipamento sofre uma paragem por algum motivo, é criada uma indisponibilidade.

Para medir a disponibilidade de um equipamento, relaciona-se o tempo de funcionamento com o tempo requerido, aplicando a Equação 2.1.

$$Do = \frac{TF}{TR} = \frac{TR - (TPP + TPI)}{TR} \quad (2.1)$$

Onde:

Do – Disponibilidade operacional

TF – Tempo de Funcionamento

TR – Tempo Requerido

TPP – Tempo de Paragens Próprias

TPI – Tempo de Paragens Induzidas

Ainda, é possível definir a Disponibilidade própria (*Dp*) através da Equação 2.2:

$$Dp = \frac{TF}{TF + TPP} \quad (2.2)$$

Onde:

Dp – Disponibilidade própria

Em adição, a Disponibilidade induzida (*Di*) é descrita pela Equação 2.3:

$$Di = \frac{TR - TPI}{TR} \quad (2.3)$$

Onde:

Di – Disponibilidade induzida

A Disponibilidade operacional também pode ser definida pelo produto da Disponibilidade própria e a Disponibilidade induzida (Equação 2.4).

$$Do = Dp \times Di \quad (2.4)$$

Nível de qualidade

O índice do nível de qualidade relaciona o Número de Peças Boas Fabricadas com o Número de Peças Realizadas. Na Equação 2.5 é calculada a Taxa de qualidade (Tq) onde são contabilizadas as peças produzidas com defeitos ou perdas que aconteceram no arranque do equipamento.

$$Tq = \frac{NPB}{NPR} \quad (2.5)$$

Onde:

Tq – Taxa de qualidade

NPB – Número de Peças Boas Fabricadas

Produtividade

A produtividade é um indicador de desempenho no qual é calculado a eficácia de um equipamento. A Produtividade operacional (Po) é apresentada através da Equação 2.6.

$$Po = \frac{NPR}{TR} \quad (2.6)$$

Onde:

Po – Produtividade operacional

NPR – Número de Peças Realizadas

Outro indicador útil para garantir a confiabilidade e a eficiência de um equipamento é a Produtividade própria (Pp).

A Produtividade própria é utilizada para analisar a capacidade de um equipamento operar de forma consistente e eficaz ao longo do tempo, permitindo compreender o desempenho detalhado dos equipamentos.

A Produtividade própria é obtida a partir da Equação 2.7, fornecendo dados cruciais para a manutenção e ajudar na melhoria das operações.

$$Pp = \frac{NPR}{TF + TPP} \quad (2.7)$$

Onde:

Pp – Produtividade própria

Rendimento

Existem dois tipos de rendimento a serem utilizados como indicadores de desempenho, o primeiro é o Rendimento velocidade (Rv), determinado pela Equação 2.8, que divide o Tempo de ciclo teórico, que representa o tempo teórico para produzir uma peça, pelo Tempo de ciclo real médio (Equação 2.9).

$$Rv = \frac{Tcth}{Tcm} \quad (2.8)$$

Onde:

Rv – Rendimento velocidade

$Tcth$ – Tempo de ciclo teórico

Tcm – Tempo de ciclo real médio

$$Tcm = \frac{TF}{NPR} \quad (2.9)$$

O Rendimento operacional (Ro) avalia a eficiência do equipamento ao dividir o Número de Peças Boas pelo número teórico em tempo definido, calculado pela Equação 2.10.

$$Ro = \frac{NPB}{NPTR} \quad (2.10)$$

Onde:

Tq – Rendimento operacional

NPTR – Número de peças teoricamente realizáveis no tempo requerido

Para calcular o Número de peças teoricamente realizáveis no tempo requerido é utilizada a Equação 2.11:

$$NPTR = \frac{TR}{Tcth} \quad (2.11)$$

O produto da Disponibilidade operacional, Rendimento velocidade e Taxa de qualidade permite igualmente calcular o Rendimento operacional, representado na Equação 2.12.

$$Ro = Do \times Rv \times Tq \quad (2.12)$$

2.2 Testes estatísticos da fiabilidade

A fiabilidade de um equipamento corresponde à probabilidade de o mesmo funcionar corretamente. Para calcular a fiabilidade de um equipamento é necessário considerar o tempo em que o equipamento funciona sem sofrer paragens, em função do tempo em que este está a desempenhar as funções para qual foi concebido (Lin & Chang, 2013).

Numa fábrica com uma linha de produção em que as diferentes máquinas dependem umas das outras para manter a produção ativa, uma falha num dos equipamentos pode resultar em paragens não planeadas, interferindo com o planeamento da produção. O cálculo da fiabilidade de um equipamento ajuda o departamento de manutenção a compreender melhor o comportamento de cada máquina, e consequentemente, a melhorar a eficiência das operações de forma global.

As origens do conceito de fiabilidade remontam aos tempos da revolução industrial, quando as fábricas eram locais tendencialmente propensos a acidentes de trabalho. De forma a reduzir o número de acidentes de trabalho, começaram a ser procuradas abordagens capazes de aumentar a segurança no local de trabalho, o que culminou no desenvolvimento de técnicas para aumentar a fiabilidade dos equipamentos. Com o tempo, passaram a ser utilizados métodos estatísticos para analisar cada equipamento, bem como a criação de novas normas de segurança em benefício dos trabalhadores (Hsieh, 2023).

O campo da fiabilidade no mundo empresarial continuou a evoluir até ao século XXI, acompanhando o desenvolvimento de novas tecnologias. Com o auxílio da internet e computadores, os engenheiros foram capazes de utilizar técnicas avançadas, tais como a

monitorização preditiva e a inteligência artificial (Zhou *et al.*, 2007). Estas inovações permitiram uma gestão mais proativa e eficaz dos equipamentos, resultando numa melhoria da qualidade dos produtos produzidos, o que, por sua vez, aumentou a satisfação dos clientes.

Neste momento, o controlo da fiabilidade é essencial para tornar os sistemas de produção mais seguros e fiáveis, de forma a satisfazer a capacidade de produção pretendida.

Para compreender o comportamento das falhas num equipamento, é necessário realizar uma análise estatística das mesmas. Esta análise estatística baseia-se no registo das falhas ocorridas ao longo de um período recente, permitindo assim investigar o desempenho do equipamento. Para estudar a evolução da taxa de falhas ao longo do período em análise é utilizada a ordem cronológica das falhas ao longo do histórico (Ansell & Phillips, 1989).

Para uma interpretação mais aprofundada do comportamento dos equipamentos, é necessário conhecer o tempo de vida do sistema no momento de ocorrência das falhas e o intervalo de tempo considerado para a execução da análise estatística das falhas deve ser devidamente delimitado.

A estimativa estatística do momento em que ocorre a falha é utilizada para realizar medidas de degradação dos equipamentos, sendo este um dos principais testes estatísticos no âmbito da fiabilidade (Ansell & Phillips, 1989).

Análise de sobrevivência

A análise de sobrevivência corresponde a um conjunto de testes estatísticos utilizados na análise de dados, que visam estudar o tempo decorrido até à ocorrência de um evento de interesse, neste caso uma falha num sistema de produção (Zheng & Zhang, 2023).

Os objetivos da análise de sobrevivência consistem em estimar e interpretar as funções de risco dos dados de sobrevivência, bem como avaliar a relação das variáveis explicativas com o tempo de sobrevivência. Esta abordagem estatística permite compreender a probabilidade e o padrão de ocorrência do evento de interesse, auxiliando na tomada de decisões e na identificação de fatores que possam influenciar a duração ou até a ocorrência do mesmo (Zheng *et al.*, 2023).

A análise de sobrevivência pode ser aplicada em diversas áreas, como na engenharia, medicina e economia, nas quais a investigação de eventos de sobrevivência e a sua relação com variáveis explicativas são fundamentais para compreender e melhorar os processos e os tipos de sistemas em questão.

Indicadores de desempenho da fiabilidade

Os indicadores utilizados para calcular o desempenho da fiabilidade têm como finalidade estudar a taxa de falhas e os tempos associados às suas paragens. A falha é definida como a incapacidade de um equipamento ou sistema de cumprir o desempenho esperado (Hsieh, 2023).

O estudo da fiabilidade de um sistema produtivo baseia-se nos seguintes indicadores de desempenho da fiabilidade: a taxa de falhas, o tempo médio entre falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*), o tempo médio para reparação (MTTR - *Mean Time to Repair*) e o tempo médio de funcionamento (MTTF - *Mean Time to Failure*).

Tempo médio entre falhas - MTBF

O *Mean Time Between Failures* (MTBF) corresponde à média de tempo entre falhas num equipamento. O tempo médio entre falhas é uma métrica crucial para analisar o desempenho e a segurança de um equipamento. Este indicador é utilizado para o planeamento de inspeções, recalibrações e substituições preventivas de peças num sistema de produção (Wu *et al.*, 2023).

O tempo entre falhas é medido desde o fim de uma reparação até ao início da seguinte. O cálculo do MTBF é determinado pelo rácio entre o tempo acumulado desde a última falha e o número de falhas, conforme expresso na Equação 2.13:

$$MTBF = \theta = \frac{\sum TBF}{N} \quad (2.13)$$

Onde:

TBF – Tempo entre falhas

N – Número de falhas ocorridas no período em análise

As falhas podem ter diversas origens e níveis de criticidade. Para que os técnicos de manutenção possam compreender a frequência em que ocorrem avarias ao longo do tempo de funcionamento do equipamento, é calculada a taxa de falhas (λ).

A taxa de falhas representa o número de falhas por unidade de tempo, expressa pela Equação 2.14. Este indicador é fundamental para analisar a fiabilidade do equipamento e permite aos técnicos de manutenção antecipar e planear intervenções de manutenção de forma eficiente.

Através do cálculo da taxa de falhas, é possível identificar e analisar potenciais pontos fracos do sistema, contribuindo para um maior controlo do desempenho da linha de produção, assim como da disponibilidade de cada equipamento (Sami & Khan, 2023).

$$\lambda = \frac{N}{T} \quad (2.14)$$

Uma das formas mais comuns de representar a taxa de falhas de um equipamento ao longo do seu ciclo de vida é através de um gráfico chamado de "Curva da banheira", como representado na Figura 2.5.

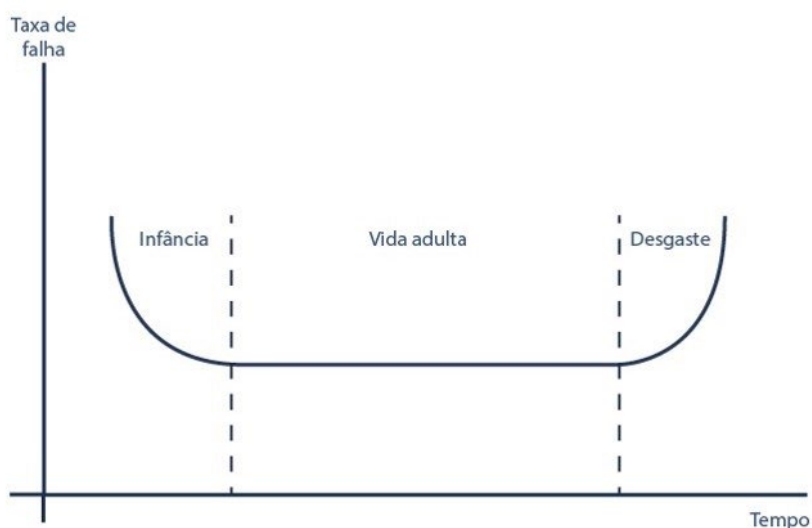


Figura 2.5 - Curva da Banheira.
Adaptado de (Klutke *et al.*, 2003)

Quando a taxa de falhas de um equipamento segue a curva da banheira, este apresenta uma taxa de falha que varia entre três estágios durante a sua vida útil: o período de falhas iniciais ou infância, uma fase de vida útil mais longa com uma taxa de falhas relativamente baixa e, por último, o período de desgaste em que apresenta um número crescente de falhas (Klutke *et al.*, 2003).

Quando a taxa de falhas é constante, existe uma abordagem alternativa para calcular o MTBF. A alternativa de cálculo do MTBF é especialmente útil quando a taxa de falhas permanece estável ao longo do tempo, simplificando assim a determinação do tempo médio entre falhas.

O MTBF pode ser igualmente calculado através da Equação 2.15:

$$MTBF = \hat{\theta} = \frac{1}{\hat{\lambda}} \quad (2.15)$$

A Equação 2.15 do MTBF é uma ferramenta importante em análises de fiabilidade, pois permite uma avaliação mais precisa do desempenho do equipamento sob condições em que a taxa de falhas é uniforme e previsível (Çolak *et al.*, 2023).

Para casos em que se está perante um equipamento reparável, é possível calcular o MTBF mínimo (θ_i), que representa o tempo médio mínimo entre falhas, correspondendo à taxa de falhas máxima. Os equipamentos reparáveis podem sofrer várias falhas ao longo do seu tempo de vida.

O cálculo da MTBF mínimo é definido pela Equação 2.16:

$$\theta_i = \frac{2 \times T}{x_{\alpha, 2 \times (n_f + 1)}^2} \quad (2.16)$$

Onde:

T – Tempo total de funcionamento

n_f – Número de falhas

Numa análise de fiabilidade, é importante calcular o MTBF mínimo, uma vez que este permite determinar do intervalo mínimo de tempo esperado entre duas falhas subsequentes de um sistema de produção.

Através do MTBF mínimo, é possível avaliar a eficiência e a robustez do equipamento em relação às falhas ao longo do seu ciclo de vida, fornecendo informações valiosas para a gestão da manutenção e para a tomada de decisões relacionadas com a disponibilidade e o desempenho do sistema (Alrabghi *et al.*, 2017).

Tempo médio de funcionamento - MTTF

O *Mean Time to Failure* (MTTF) é uma métrica que mede o tempo médio de funcionamento de um equipamento não reparável antes de ocorrer uma falha. O MTTF pode também ser considerado como a duração média de vida útil de um bem, sendo relevante apenas para equipamentos que não podem ser reparados.

O MTTF pode ser obtido através da Equação 2.17:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.17)$$

O cálculo do tempo médio de funcionamento é uma parte fundamental da análise de fiabilidade. Esta métrica é importante para analisar os componentes individuais que fazem parte de um equipamento (Ansell & Phillips, 1989). Por exemplo, se uma correia falhar, pode levar à falha do motor, resultando na interrupção da produção.

Conhecer o MTTF dos componentes contribui para a redução dos tempos de paragem nas linhas de produção e pode ser utilizado para desenvolver estratégias de manutenção mais eficientes. Desta forma, a dependência da manutenção corretiva pode ser minimizada, ao passo que a utilização da manutenção preditiva é incrementada.

2.3 Sistemas reparáveis

Um dos campos de estudo abrangido pela fiabilidade é a análise de sistemas reparáveis.

São denominados como sistemas reparáveis aqueles que, quando sujeitos a uma falha, podem ser restaurados para voltarem a realizar as suas funções corretamente após passarem por um processo de manutenção, em vez de serem substituídos integralmente (Syamsundar *et al.*, 2021).

Exemplos de produtos que são considerados como sistemas reparáveis incluem carros, máquinas de lavar e frigoríficos. Este tipo de produtos são compostos por diversos componentes, o que os torna complexos.

Quando ocorre uma avaria em um dos componentes do produto, é possível substituir o componente que apresenta uma falha sem necessitar da substituição completa do

produto, promovendo assim a economia de recursos e reduzindo o impacto ambiental (Figura 2.6).



Figura 2.6 - Componentes que fazem parte de um carro.
(Zhang & Xu, 2022)

A análise do comportamento das falhas é essencial para compreender o funcionamento das falhas de um sistema reparável, com o objetivo de compreender a evolução das falhas no sistema ao longo do tempo através da análise da sua fiabilidade.

Teste de Laplace

O teste de Laplace é um teste estatístico não paramétrico que tem como objetivo verificar se a sequência de acontecimentos é independente e identicamente distribuída entre si, ou seja, se existe uma tendência nos dados (Puig & Stephens, 2000).

Ao aplicar o teste de Laplace, parte-se da premissa da hipótese nula (H_0) como verdadeira, onde a taxa de falhas é constante. Deste modo, o teste de Laplace avalia se as falhas ocorrem segundo um Processo de Poisson Homogêneo (PPH), sendo o intervalo de tempo entre as falhas modelado através de uma distribuição Exponencial Negativa.

Por outro lado, se H_0 não for verdadeiro, aceita-se a hipótese alternativa (H_1), o que significa que os tempos entre falhas apresentam dependências entre si. Neste caso, como os tempos entre falhas apresentam uma tendência, a hipótese comprova a presença de uma taxa de falhas não constante e que obedece um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH) (Zhao & Xie, 1996).

Assim, para um nível de significância de 10%, o teste de hipótese é dado por:

H_0 : Taxa de avarias constante (PPH)

H_1 : Taxa de avarias crescente ou decrescente (PPNH)

No caso de o teste ser limitado pelo tempo, a estatística de teste (Z_0) é definida pela Equação 2.18:

$$Z_0 = \left(\sqrt{12 \times n_f} \right) \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_f} t_i}{T_0 \times n_f} - 0,5 \right) \quad (2.18)$$

Onde:

n_f - Número de falhas

t_i - Tempo de vida do sistema no momento da falha de ordem i

Quando o teste é limitado pelo número de falhas, Z_0 assume-se a expressão da Equação 2.19:

$$Z_0 = \left(\sqrt{12 \times (n_f - 1)} \right) \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_f-1} t_i}{T_0 \times (n_f - 1)} - 0,5 \right) \quad (2.19)$$

A conclusão que se retira do Teste de Laplace é comum para a Equação 2.18 e a Equação 2.19. No pressuposto de um PPH, a hipótese nula H_0 é rejeitada se tender para uma distribuição normal reduzida, isto é, se $Z_0 > \left| Z_{\frac{\alpha}{2}} \right|$, para um determinado nível de significância α . Caso esteja fora do intervalo de confiança de Z_0 pode-se concluir que se está perante um PPNH com tendência. Valores negativos indicam uma tendência da taxa de falhas decrescente, enquanto valores positivos revelam uma tendência de taxa de falhas crescente (Gonzalo *et al.*, 2022).

Os valores $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ seguem uma distribuição normal reduzida (Figura 2.7).

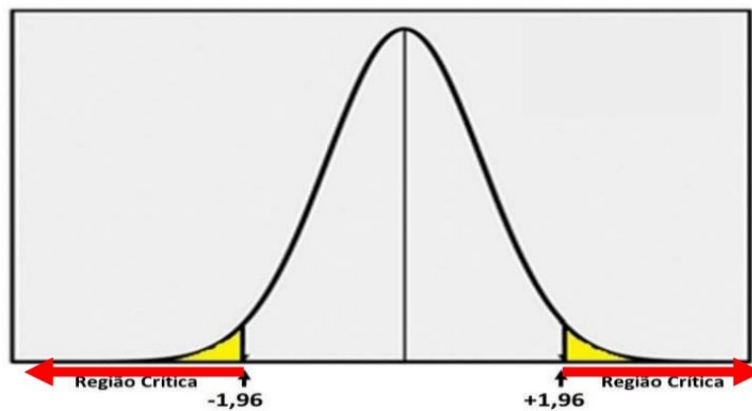


Figura 2.7 - Curva normal reduzida.
(Moreno & Morcillo, 2019)

Processos de Poisson

Os processos estocásticos ocorrem de forma aleatória ao longo do tempo, estes podem ser do tipo discreto ou contínuo. Para o estudo da fiabilidade, são explorados os processos discretos, mais especificamente os pontuais, pois estes possibilitam a descrição de séries de acontecimentos que ocorrem aleatoriamente ao longo do tempo (Ansell & Phillips, 1989).

Existem vários modelos estocásticos pontuais, e neste estudo vão ser analisados os Processos de Poisson Homogéneos.

Processo de Poisson Homogéneo - PPH

Entende-se por Processo de Poisson Homogéneo todo o tipo de processo com uma sequência infinita de tempos entre avarias, independentes e distribuídos de forma exponencialmente idêntica, com uma taxa de falhas (λ) constante.

De acordo com (Gonzalo *et al.*, 2022), um processo estocástico pontual $\{N(t), t \geq 0\}$ é um PPH se:

- $N(0) = 0$;
- $\{N(t), t \geq 0\}$, o processo é incrementado de forma independente.
- O número de falhas em qualquer intervalo de tempo Δt segue uma distribuição de Poisson com um valor médio de $m = \lambda \times \Delta t$.

Assim, a probabilidade de ocorrerem n_f falhas num determinado Δt é dada pela Equação 2.20.

$$P\{N(\Delta t) = n_f\} = \frac{e^{-m} m^{n_f}}{n_f!} \quad (2.20)$$

A fiabilidade de um sistema que, para um intervalo Δt , pode ser ajustada a um sistema que falhe segundo um PPH, com uma função densidade de probabilidade Exponencial Negativa, é obtida através da Equação 2.21.

$$R(\Delta t) = e^{-\lambda \times \Delta t} \quad (2.21)$$

ESTUDO DE CASO

O presente capítulo tem como objetivo descrever o estudo de caso. Neste capítulo é apresentada a empresa objeto de estudo, são caracterizados os processos que compõem a linha de produção, é analisada a gestão de manutenção praticada na fábrica, são identificadas as causas de paragem existentes e são formuladas propostas de melhoria.

3.1 Apresentação da empresa

A fábrica que serviu de cenário para o desenvolvimento deste estudo é a Tetra Pak Tubex Portugal. Integrada no grupo Tetra Pak, esta fábrica desempenha um papel importante no âmbito industrial ao dedicar-se à manufatura de embalagens destinadas a alimentos.

No decorrer deste estudo de caso, foi realizada uma apresentação detalhada das variadas áreas de negócio da empresa, bem como uma análise dos mercados nos quais a mesma opera. Em adição, é feita uma descrição minuciosa de cada etapa do processo na linha de produção selecionada, de modo a estabelecer uma compreensão profunda e abrangente dos processos internos.

3.1.1 Grupo Tetra Pak

Fundada em 1951 por Ruben Rausing, a Tetra Pak é uma multinacional sueca especializada no fabrico de embalagens para alimentos e líquidos, incluindo categorias como água, leite e sumos (*Tetra Pak*, 2023).

A Tetra Pak apresentou-se ao mercado com uma máquina pioneira capaz de embalar leite de maneira segura e higiénica, com embalagens no formato de um tetraedro. Ao longo

dos anos seguintes, as embalagens em formato de tetraedro ganharam notoriedade em toda a Suécia. Em 1954, a Tetra Pak deu início à comercialização de máquinas de embalar leite de 500 ml para diversos países europeus, tais como na França, Itália e Alemanha. No início dos anos 60, a empresa alcançou territórios internacionais, inaugurando sua primeira fábrica internacional no México em 1960. Dois anos depois, em 1962, foi estabelecida uma outra fábrica nos Estados Unidos (*Tetra Pak*, 2023).

Desde então, a organização tem mantido uma visão comprometida com a segurança e a acessibilidade dos alimentos em todo o mundo, solidificando a Tetra Pak como um dos principais fornecedores globais de embalagens para leite, bebidas e alimentos.

A tecnologia inovadora desenvolvida pela Tetra Pak contribuiu significativamente para conferir a higiene necessária para consumo dos seus produtos, ao desenvolver um método capaz de preservar o líquido dentro das suas embalagens, ao revestir a embalagem de cartão com plástico.

Atualmente, a Tetra Pak mantém uma rede global composta por 42 fábricas e uma presença comercial abrangente. O grupo conta com uma equipa de 23000 colaboradores e distribui os seus produtos em mais de 175 países. Conforme dados divulgados pela própria empresa, foram vendidas um total de 192 bilhões de embalagens, o que corresponde a um total de 11,145 bilhões de euros no ano de 2021 (*Tetra Pak*, 2023).

Um dos marcos distintivos da Tetra Pak é a sua tecnologia inovadora de embalagens assépticas (Figura 3.1). Este processo consiste na esterilização separada da embalagem e do produto alimentar, que posteriormente combina os dois num ambiente estéril. Este método permite a preservação de alimentos e líquidos perecíveis durante a distribuição, garantindo a qualidade dos produtos no armazenamento por períodos prolongados.



Figura 3.1 - Tipos de produtos produzidos pela Tetra Pak.
(*Tetra Pak*, 2023)

A Tetra Pak está dividida em cinco clusters geográficos, apoiados por quatro unidades operacionais: comercial, desenvolvimento e serviços, *supply chain* e sistemas de processamento. Uma das responsabilidades da unidade operacional de *supply chain* é o fabrico e distribuição de embalagens e materiais adicionais. As fábricas de materiais adicionais são responsáveis pelo fabrico de palhinhas e tampas. No total, existem 12 fábricas de palhinhas em todo o mundo que pertencem ao grupo Tetra Pak, incluindo a Tetra Pak Tubex Portugal (Figura 3.2).

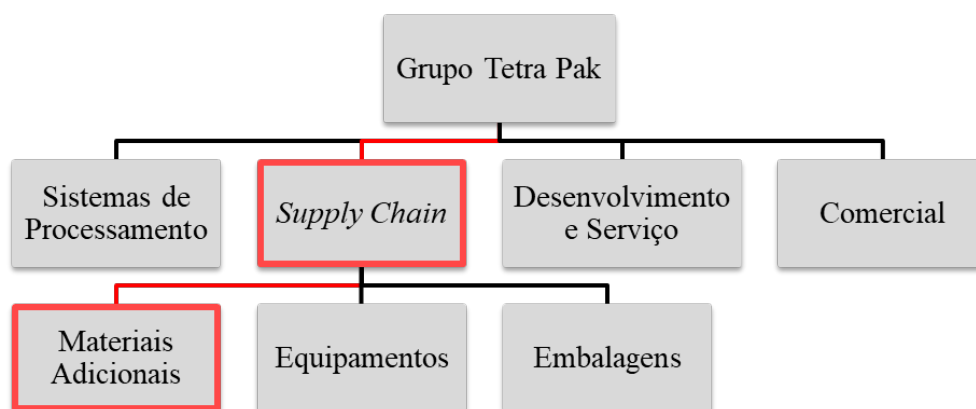


Figura 3.2 - Estrutura organizacional da Tetra Pak.

A cultura da empresa toma forma através da sua visão, missão e valores. Estes elementos conferem identidade à organização e possibilitam a construção de uma marca orientada para o respeito ao meio ambiente, responsabilidade social e foco no cliente.

Os valores da Tetra Pak definem a cultura pela qual a empresa rege-se. Estes guiam os comportamentos internos e externos da organização, ao procurar unir as pessoas independentemente da sua cultura, idade, sexo e cor da pele, para que haja respeito mútuo entre todos os colaboradores de forma a criar um ambiente adequado para a empresa.

A empresa está empenhada em tornar a venda de alimentos acessível no maior número de locais possível, garantido a segurança para o consumo. Esta visão define o papel da empresa para o mundo exterior e descreve a ambição da marca de impulsionar a inovação na sua indústria.

A missão da empresa é organizar soluções de processamento de embalagens para alimentos de acordo com as necessidades do cliente e melhorar as relações com os seus fornecedores para melhorar o transporte e armazenamento dos produtos até chegarem ao seu destino final.

Na Tetra Pak, a preservação ambiental é um pilar de extrema relevância. A empresa acredita na capacidade de manter uma liderança responsável na indústria, cultivando um crescimento consciente em relação à sustentabilidade ambiental. A organização trabalha para um futuro sustentável para o planeta Terra e tem uma preocupação com o ambiente a longo prazo, contribuindo diretamente para 10 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (Tetra Pak, 2023).

3.1.2 Tetra Pak Tubex Portugal

A Tetra Pak Tubex Portugal (Figura 3.3), situada em Carnaxide, freguesia do município de Oeiras, emerge como uma instalação fabril especializada na manufatura de palhinhas de papel em duas variantes únicas.



Figura 3.3 - Fábrica Tetra Pak Tubex Portugal.

O foco da fábrica não reforça apenas o seu compromisso com a produção de soluções sustentáveis, mas também enriquece significativamente a variedade de opções disponíveis no mercado, consolidando assim o seu papel na promoção da sustentabilidade ambiental e no atendimento às necessidades dos seus clientes.

Existem dois tipos distintos de palhinhas que são produzidos na Tetra Pak Tubex Portugal: a palhinha flexível, que possui uma das extremidades corrugadas de maneira a facilitar dobras sem risco de quebra e que possibilita uma absorção mais confortável dos líquidos, e a palhinha reta, uma palhinha sem dobra e que é de menor dimensão.

A variação da especificação do tamanho de cada produto varia de linha para linha (Figura 3.4).

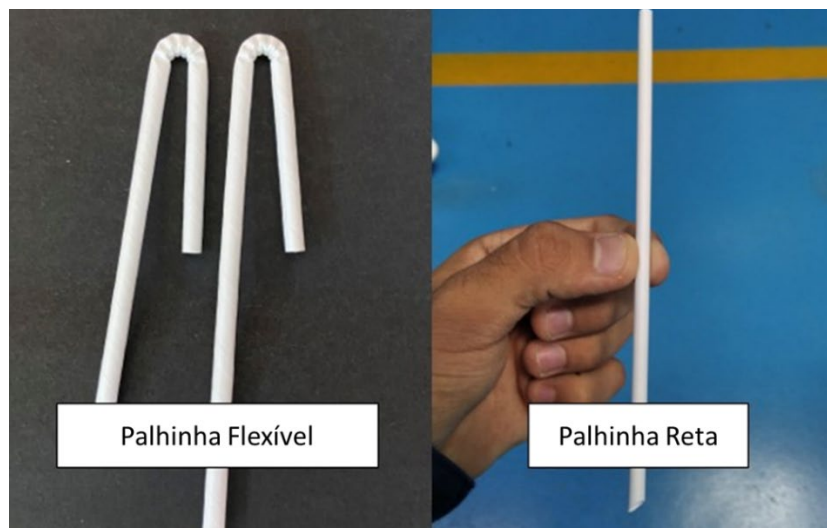


Figura 3.4 - Palhinha flexível e palhinha reta.

Desde a sua fundação na década de 1980, a Tetra Pak Portugal tem desempenhado um papel de liderança no setor de fabrico de palhinhas. É reconhecida como um centro de competência crítico e de apoio ao resto da organização.

A fábrica, situada em Carnaxide, encontra-se no cluster geográfico que abrange a Europa e a Ásia Central. Deste modo, desde início os seus principais mercados foram a Europa e o Norte de África.

Devido à sua posição estratégica e ao número de clientes que atende, em 1990, a empresa decidiu expandir a sua capacidade e a variedade de produtos fabricados, criando linhas de produção e melhorando a sua gestão interna. Nos anos seguintes, foram implementados sistemas de gestão de qualidade e ambiental, obtendo certificações de acordo com as normas ISO 9001 e 14001.

Em 2020, a fábrica deixou de produzir palhinhas de plástico e começou a fabricar palhinhas de papel. Após esta mudança, os tamanhos das palhinhas foram ajustados, mas o tipo de produto permaneceu o mesmo.

Há dois anos, em 2021, a fábrica distribuiu cerca de 3,4 mil milhões de palhinhas de papel, sendo que a palhinha flexível foi a mais vendida, representando 77% do total de vendas.

A Tetra Pak Tubex Portugal possui um total de sete linhas de produção, das quais cinco são destinadas à palhinha flexível e duas à palhinha reta:

- **Linha Azul** - Palhinha flexível com 145 mm de comprimento e 5 mm de largura;
- **Linha Vermelha, Laranja e Amarela** - Palhinha flexível com 165 mm de comprimento e 5 mm de largura;
- **Linha nº14** - Palhinha reta com 100 mm de comprimento e 5 mm de largura;
- **Linha nº5** - Palhinha reta com 116 mm de comprimento e 5 mm de largura.

3.2 Caracterização do processo de produção e gestão de manutenção na fábrica

Para a realização deste estudo, foi selecionada a linha de produção denominada de "linha laranja", responsável pela produção de palhinhas flexíveis com 165 mm de comprimento e 5 mm de largura. Esta linha de produção foi selecionada devido às suas modificações mais recentes a nível mecânico e tecnológico.

A linha laranja serve como uma linha de produção para executar testes para as mais recentes inovações e melhorias no processo de fabrico de palhinhas flexíveis. Os técnicos de manutenção efetuam avaliações rigorosas, onde analisam o desempenho da linha, a qualidade do produto final e a eficiência operacional.

Os resultados dos testes executados na linha laranja têm um papel crucial na decisão de implementar ou não as alterações nas restantes linhas de produção da fábrica. Quando as melhorias se traduzem em vantagens positivas, como aumento da produtividade, redução de resíduos ou maior fiabilidade das máquinas, as mudanças são gradualmente estendidas para toda a fábrica.

A gestão de manutenção na Tetra Pak Tubex Portugal é uma parte fundamental da operação diária. Os técnicos de manutenção não só garantem o funcionamento eficiente das máquinas, como também desempenham um papel proativo na identificação de possíveis problemas e na implementação de ações preventivas. Este enfoque na manutenção preventiva contribui para a redução de paragens não planeadas e assegura a continuidade da produção.

3.2.1 Caracterização do processo de fabrico

O processo de fabrico da palhinha flexível é composto por um conjunto de etapas cujas operações ocorrem sequencialmente, divididas em quatro zonas de trabalho: formação de tubos de papel, formação da palhinha flexível, deteção de defeitos e paletização. Cada zona de trabalho tem as suas funções específicas para acrescentar valor ao produto.

O processo é definido pelo diagrama da Figura 3.5. O diagrama descreve as primeiras ações feitas na formação do tubo e expõe cada uma das atividades até ao produto final.

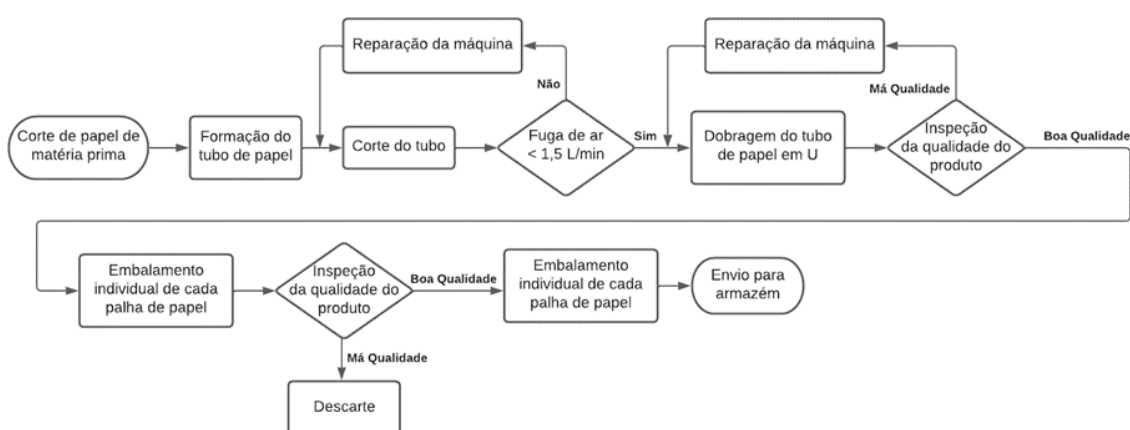


Figura 3.5 - Diagrama do processo de fabrico da palhinha flexível.

A linha laranja é composta por processos automáticos e manuais. Os operadores são apenas responsáveis pela execução dos processos manuais. Este tipo de processo exige uma maior atenção aos detalhes, por incluir momentos de decisão que são difíceis de automatizar ou porque a organização da fábrica optou por não investir na automatização deste processo. As tarefas executadas manualmente incluem, entre outras, a reposição de materiais pelos operadores, como o rolo de papel, a cola quente e a cola fria na zona de formação dos tubos, os filmes de plástico na zona de fabrico das palhinhas flexíveis e as caixas de papel na zona de paletização. Outras operações manuais incluem o transporte das palhinhas *WIP* (*Work in Progress*) de uma zona de trabalho para outra e a remoção de palhinhas defeituosas na zona de deteção de defeitos.

Em processos automáticos, a máquina executa todos os passos necessários. Neste tipo de processo, o operador apenas supervisiona o trabalho da máquina na eventualidade de acontecer alguma falha. A máquina realiza todo o trabalho quando são efetuados processos de cortes no papel, dobras e inspeção visual.

A linha laranja utiliza sensores na zona de formação dos tubos para controlar a qualidade do produto que está a ser fabricado. Estes sensores monitorizam as diferentes especificações que compõem os tubos, tais como a espessura do papel, a largura e o comprimento dos tubos e a quantidade de cola aplicada durante o processo de colagem. Os operadores utilizam esta informação para determinar se a máquina está a produzir os produtos dentro dos limites de qualidade definidos e para monitorizar o estado de degradação das peças que compõem a máquina, de forma a saber quando é necessário efetuar qualquer tipo de manutenção.

A linha de produção em análise tem a capacidade de produzir uma caixa de 20 mil palhinhas de papel a cada 48 minutos, em condições ideais, caso não ocorram interrupções, o que corresponde a 30 caixas por dia. No entanto, a linha de produção atualmente produz uma média de 22 caixas de palhinhas flexíveis por dia. A produção desta linha é realizada em lotes, tendo em conta as encomendas dos clientes.

O processo de fabrico das palhinhas flexíveis tem início na zona de trabalho denominada de formação dos tubos (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Máquina responsável pela formação dos tubos de papel.

Na máquina da Figura 3.6, um operador com a devida formação é responsável por colocar um rolo de papel no local apropriado. Esta primeira máquina é responsável por formar os tubos de papel e desenrolar o rolo de papel de forma precisa, alimentando a máquina que lhe procede. No momento seguinte, inicia-se a formação dos tubos que se vão tornar palhinhas.

A zona de trabalho onde são formados os tubos de papel está dividida em quatro etapas distintas:

- **Corte do papel** - Separação do papel em duas tiras;
- **Aplicação da cola** - Aplicação de cola fria e quente nas tiras de papel;
- **Sobreposição** - Sobreposição de ambas as tiras de papel;
- **Fecho e formação do tubo** - Colagem das tiras de maneira a formar os tubos.

O tubo de papel formado é encaminhado para a máquina seguinte, onde é cortado em pequenos segmentos com cerca de 360 mm cada um. Após o corte, os tubos de papel são armazenados e recolhidos num carrinho (Figura 3.7), que será enviado para a etapa seguinte quando estiver cheio.



Figura 3.7 - Carrinhos de transporte a receber os tubos de papel.

Não há uma quantidade específica de palhinhas no carrinho de transporte que indique que ele está completo. A decisão de enviar as palhinhas para a próxima fase é tomada pelo operador. Devido a esta flexibilidade, o número de palhinhas na zona de trabalho "Formação da palhinha flexível" é irregular, o que pode causar alguns congestionamentos no processo de fabrico.

Para garantir a qualidade dos tubos de papel, a cada 30 minutos, são recolhidas dez amostras para realizar um teste de perda de ar nos tubos.

O operador para efetuar o teste de perda de ar nos tubos, coloca o tubo de papel num dispositivo que calcula a quantidade de ar perdida por minuto (Figura 3.8). O tubo para ser considerado adequado, não deve exceder os limites definidos para o parâmetro da perda de ar, a medição do equipamento não deve exceder 1,5 L/min de perda de ar. Após obter os

resultados do teste, os valores são então registados numa base de dados para análise posterior.

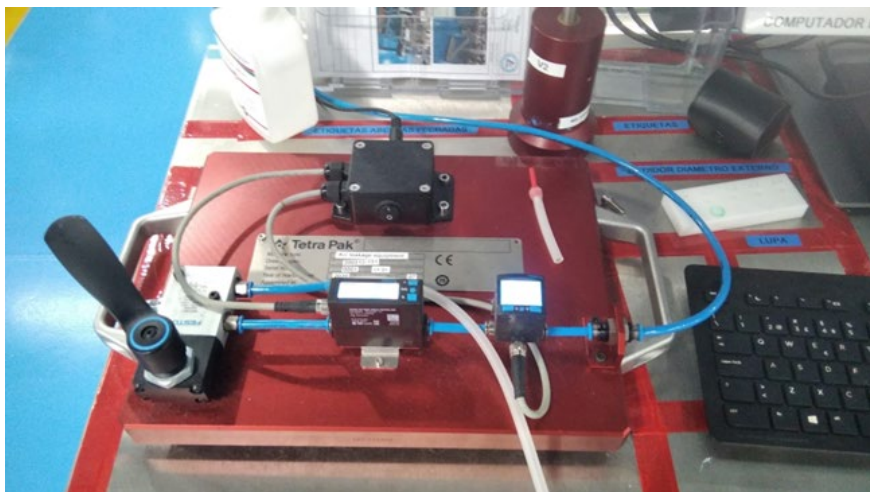


Figura 3.8 - Equipamento para testar a perda de ar dos tubos de papel.

Na etapa seguinte, a extremidade do tubo de papel é dobrada para dar forma à palhinha numa máquina de corte e dobragem em forma de U (Figura 3.9). Neste ponto do processo, a máquina corta os tubos ao meio, corta a extremidade da palhinha, cria uma saliência na zona onde a palhinha se dobra e faz a dobra do tubo em forma de U. Em seguida, as palhinhas são seladas com um filamento de plástico, enquanto são inspecionadas visualmente pelo operador, que procura defeitos enquanto as palhinhas saem da máquina e são direccionadas para um carrinho de transporte.



Figura 3.9 - Máquina de corte e dobragem em forma de U.

Caso o operador detete defeitos nas palhinhas, o processo é imediatamente interrompido para identificar a origem dos problemas. Normalmente, os defeitos nas palhinhas resultam de um dos seguintes tipos de problemas, ou a máquina de dobragem e corte está a danificar as palhinhas, ou o problema tem origem na máquina que precede este processo, o que causa defeitos em todo o lote de tubos de papel no carrinho de transporte.

Após a chegada do carrinho de transporte com as palhinhas envolvidas no filme plástico à zona de deteção de defeitos, a qualidade da embalagem é verificada novamente através de uma máquina capaz de realizar a inspeção de qualidade, utilizando uma câmara para fazer a inspeção visual (Figura 3.10).

Caso seja identificado algum defeito, a máquina alerta o operador, que irá proceder de imediato à remoção da palhinha defeituosa. No caso de não haver defeitos detetados, as palhinhas seguem para a máquina seguinte, onde são acondicionadas numa caixa destinada a ser enviada para o cliente. Este rigoroso processo de controlo de qualidade assegura que apenas as palhinhas de alta qualidade chegam aos clientes, mantendo os padrões de excelência que são esperados e valorizados pela Tetra Pak Tubex Portugal.



Figura 3.10 - Máquina de inspeção de qualidade das palhinhas.

Por último, após todo o processo de fabrico e inspeção, as palhinhas são transferidas para a zona de trabalho final, onde é realizada a paletização. Nesta etapa, a máquina de forma automática, assume a tarefa de dispor as palhinhas de forma organizada dentro das caixas que serão enviadas para o cliente.

Durante o processo de paletização são preenchidas duas caixas simultaneamente, e cada uma delas armazena exatamente 20 mil palhinhas de papel, conforme ilustrado na Figura 3.11. Este nível de precisão é fundamental para atender aos rigorosos padrões de

qualidade da empresa e para assegurar que cada cliente recebe um produto consistente e de alto nível. Quando as duas caixas estão completamente cheias, estas são seladas e enviadas para o armazém.



Figura 3.11 - Colocação das palhinhas embaladas numa caixa de cartão.

3.2.2 Gestão de manutenção atualmente praticada na fábrica

O departamento de manutenção é responsável por uma ampla gama de atividades relacionadas com a manutenção de peças e equipamentos na fábrica. Este departamento administra a manutenção em toda a organização e, para isso, colabora em conjunto com outros departamentos. Para compreender melhor a estrutura e funcionamento do departamento de manutenção, foi desenvolvido um esquema, representado na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Organização do departamento de manutenção da Tetra Pak Tubex Portugal.

O departamento de manutenção tem a responsabilidade de fazer o planeamento das tarefas de prevenção. Esta responsabilidade inclui a formação de equipas e a alocação de recursos humanos para cada atividade de manutenção.

Uma das abordagens empregues pelo departamento de manutenção da Tetra Pak Tubex Portugal para prevenir as falhas na linha de produção é a análise de dados recolhidos através de sensores capazes de monitorizar a condição dos equipamentos e o acompanhamento de indicadores de desempenho.

De forma a preparar os técnicos de manutenção, são elaboradas instruções de trabalho para lidar com potenciais falhas. Em caso de ocorrer uma falha, estas são registadas, juntamente com quaisquer anomalias detetadas num componente ou equipamento da linha de produção. Outras funções incluem o controlo de inventário de peças e materiais, o planeamento de compras de peças para reposição e gestão do orçamento de manutenção.

Na fábrica, estão em vigor um conjunto de rotinas e procedimentos de manutenção que são seguidas pelos operadores e técnicos de manutenção. São exemplos de manutenção preventiva, as atividades de limpeza, inspeção e lubrificação realizadas pelos operadores nos equipamentos (Figura 3.13). Existem ainda, outras ações que fazem parte deste tipo de manutenção, tais como a remoção do excesso de cola e desobstrução de palhinhas encravadas nos equipamentos. Estas ações não só diminuem a probabilidade de ocorrência de falhas, como também garantem a qualidade dos produtos fabricados.

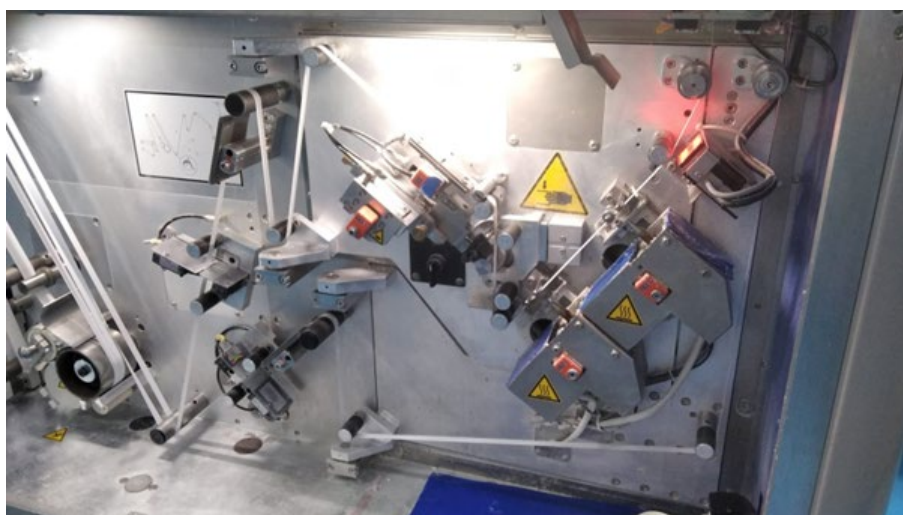


Figura 3.13 - Local da máquina onde é realizada manutenção preventiva.

Durante o estudo realizado na linha laranja, observou-se uma correlação direta entre o número de falhas e o estado de limpeza das máquinas. Este problema ocorre devido à

acumulação de cola em certas partes das máquinas, o que prejudica a colagem adequada dos tubos e, conseqüentemente leva à separação das tiras de papel. Esta situação afeta de diversas formas a produção. Um dos impactos negativos é a redução do desempenho das máquinas, afetando negativamente a sua eficiência, outro impacto, é a criação de desperdício, uma vez que as palhinhas defeituosas não podem ser reutilizadas, contribuindo assim para perdas de produção e recursos.

Outro tipo de manutenção praticada pela organização é a manutenção corretiva. Por exemplo, a correia usada na máquina que forma o tubo é utilizada até que se rompa ou esteja próxima de se romper. Deste modo, sempre que um operador identifica a necessidade de substituição da correia, a máquina é imediatamente parada e o processo de troca da correia é executado de forma manual.

A Tetra Pak Tubex Portugal emprega uma variedade de métodos de forma a fazer uma gestão eficaz da manutenção em toda a empresa. Uma ferramenta de comunicação entre operadores e técnicos de manutenção são as etiquetas de manutenção (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Etiqueta de manutenção.

Sempre que ocorre uma avaria ou anomalia na linha de produção, uma etiqueta de manutenção é criada e colocada no equipamento afetado, dando início assim a um processo de resolução do problema. Esta abordagem contribui para uma resposta rápida e eficiente às questões de manutenção, garantindo a continuidade da produção e a redução do consumo de recursos.

A etiqueta de manutenção é um sinal visual amplamente reconhecido por todos os técnicos de manutenção e operadores, permitindo o fácil reconhecimento dos equipamentos que precisam de ser reparados. A etiqueta de manutenção identifica o motivo da paragem (avaria, anomalia ou melhoria), a linha de produção em questão e o código associado à etiqueta. Em adição, o técnico de manutenção regista também o número do equipamento, a zona da máquina onde a avaria ocorreu e a peça envolvida.

Para priorizar as tarefas de manutenção em cada máquina, é atribuído um nível de gravidade (A, B ou C), e são registadas a data de abertura do problema e a hora de início. Para uma compreensão mais completa, também é fornecida uma descrição detalhada do problema ou falha funcional que motivou a criação da etiqueta de manutenção.

A fábrica utiliza um sistema de códigos que permite manter um registo detalhado de todas as etiquetas de manutenção, com cada etiqueta correspondendo a um código na base de dados. Este sistema é centralizado e fiável, mantendo um registo único para cada etiqueta de manutenção. A numeração das etiquetas é sequencial à medida que novas etiquetas de manutenção são geradas, facilitando a identificação das atividades de manutenção anteriores por parte dos técnicos de manutenção e operadores.

À semelhança da etiqueta de manutenção, o sistema informático associa cada código a informações como data e hora de abertura, bem como o estado atual da etiqueta, que pode ser "Aberto" ou "Fechado". O técnico de manutenção utiliza este sistema para registar detalhes como a causa do problema que levou à criação da etiqueta de manutenção, o diagnóstico efetuado e o método utilizado para resolver a questão. O registo também inclui informações sobre o nome do equipamento, componente, tipo de problema (se é uma "Avaria" ou uma "Anomalia") e uma avaliação da sua criticidade.

3.3 Identificação de problemas

O presente subcapítulo é dedicado à análise do desempenho da linha de produção selecionada para realizar o estudo, assim como o estudo da fiabilidade do equipamento identificado como ponto crítico.

Os dados utilizados para fazer a análise de produtividade de cada equipamento que pertence à linha de produção são registados numa base de dados interna durante a produção. Quando ocorre uma interrupção de um equipamento, a razão de paragem é identificada pelo operador e a informação é enviada para a base de dados do equipamento.

Neste estudo, para poder realizar os testes estatísticos necessários para compreender melhor o comportamento das falhas, foram utilizados os dados históricos recolhidos durante um certo período de tempo.

De forma a controlar e analisar os valores estatísticos de cada equipamento para fazer diagnósticos, foram verificados os principais KPIs (*Key Performance Indicators*). Exemplos de KPIs frequentemente utilizados neste tipo de indústria são:

- Número de produtos produzidos;
- Número de produtos com defeito;
- Tempo de inatividade da máquina;
- Tempo decorrido durante a produção.

Para controlar os KPIs de cada linha de produção a Tetra Pak Tubex Portugal utiliza um software de gestão de produção. Este processo automático reduz o desperdício de tempo associado à análise de cada equipamento, agilizando assim a avaliação de falhas.

Na Tetra Pak Tubex Portugal, os equipamentos estão inseridos numa linha de produção, ou seja, cada etapa do processo ocorre sequencialmente. Por isso, quando ocorre uma falha num equipamento que obriga a interromper o seu funcionamento, todas as máquinas que estão nas etapas seguintes são afetadas. Um motivo frequente de interrupção das máquinas é a falta de material.

Por esta razão, é fundamental identificar o ponto crítico na linha de produção, ou seja, o gargalo da produção que abrandará o resto do sistema de produção. Devido ao impacto do ponto crítico é crucial arranjar formas de reduzir o seu impacto, uma vez que este pode interromper ou atrasar a produção.

No caso de a zona de trabalho que corresponde ao ponto crítico da linha de produção sofrer uma avaria, existe uma diminuição da produtividade. Isto ocorre porque as restantes zonas de trabalho ficam ociosas, à espera da resolução do problema no ponto crítico. Os gargalos contribuem para uma produção defeituosa, afetando a qualidade do produto final, sendo que a imprevisibilidade que lhe está associada pode criar conflitos internos.

Uma organização deve resolver os gargalos presentes na linha de produção devido aos problemas que lhes estão associados, tais como atrasos no envio de produtos para os clientes e perda de validade dos produtos em *stock*.

3.3.1 Análise das interrupções ocorridas na linha de produção

A análise estatística foi iniciada com a identificação do equipamento definido como ponto crítico da linha de produção, para poder proceder à recolha dos dados necessários para realizar o estudo de caso.

As máquinas que compõem a linha laranja não são perfeitas e, ocasionalmente, apresentam falhas que requerem a sua interrupção. É considerado uma interrupção quando um operador interrompe o funcionamento de uma máquina para realizar uma manutenção, seja ela preventiva, preditiva ou corretiva.

Para recolher os dados necessários para analisar as interrupções da linha de produção, um operador da fábrica é responsável por recolher individualmente esta informação de cada máquina com recurso a uma pen USB (*Universal Serial Bus*). Os dados recolhidos de cada máquina incluem os principais KPIs, tais como o número de interrupções, duração de cada interrupção, razão da interrupção e tempo de produção.

Para cada equipamento da linha de produção foi verificada a disponibilidade através dos KPIs recolhidos manualmente, assim como o respetivo número de equipamentos em cada zona de trabalho (Tabela 3.1):

Tabela 3.1 - Disponibilidade e número de equipamentos em cada zona de trabalho.

Zona de Trabalho	Disponibilidade	Número de equipamentos
Formação do tubo	57%	1
Formação da palhinha flexível	74%	6
Deteção de defeitos	≥ 95%	2
Paletização	≥ 95%	2

Através da análise dos dados da Tabela 3.1, foi possível concluir que o equipamento responsável pela formação do tubo é o ponto crítico da linha de produção.

O próximo passo desta análise foi acompanhar vários turnos de produção para avaliar o desempenho de cada equipamento e recolher mais informações sobre a linha de produção em análise. Durante a observação da linha laranja, foi possível observar que, durante os turnos de produção, houve vários momentos em que a produção dos equipamentos que procedem a máquina de formação de tubos de papel tiveram de parar devido à falta de tubos de papel que estava a prosseguir para a próxima fase do processo.

Outra observação foi o facto de que os equipamentos responsáveis pela formação da palhinha flexível nunca estavam todos a funcionar ao mesmo tempo. Dos seis equipamentos disponíveis, em média, apenas quatro estavam a funcionar. Alguns destes equipamentos foram desligados porque não havia tubos de papel suficientes para inserção nesta fase, então a fábrica optou por não utilizar todos os equipamentos, uma vez que era desnecessário.

Com base nos dados da Tabela 3.1 e nas observações durante os turnos, é possível concluir que o ponto crítico da linha de produção é o equipamento responsável pela formação dos tubos de papel.

Após a seleção do equipamento, o próximo passo foi analisar o seu histórico de interrupções. A Tabela 3.2 apresenta o número de interrupções e a sua duração total para o período selecionado.

Tabela 3.2 - Interrupções do equipamento de formação do tubo de papel.

Classe de paragens	Frequência	Duração (h)
Paragem rápida	4347	633,27
Paragem automática	809	118,04
Manutenção planeada	439	200,25
Avaria	204	138,81
Logística interna	37	28,97
Pausa para almoço	7	3,79

A análise da Tabela 3.2 permite concluir que a principal causa das paragens são as paragens rápidas, com 4347 interrupções e uma duração total de 633,27 horas. As paragens rápidas ocorrem quando o operador interrompe o funcionamento da máquina para resolver problemas como acumulação de cola, remoção de tubos de papel encravados, ajuste das tiras de papel desalinhadas ou alinhamento do tubo de papel expelido durante o processo de formação do tubo.

Em segundo lugar, estão as paragens automáticas, com 809 interrupções e uma duração total de 118,04 horas. As paragens automáticas correspondem ao momento em que a máquina interrompe o processo de produção porque deteta um problema que precisa de ser corrigido através dos sensores presentes na máquina.

Em seguida, são as paragens planeadas, com 439 ocorrências e um total de 200,25 horas. As paragens planeadas referem-se a períodos em que a manutenção é realizada para procurar e tratar anomalias no equipamento antes que causem falhas.

As avarias ocupam o quarto lugar, com 204 ocorrências de interrupções e 148,81 horas de duração.

Na penúltima posição, estão as paragens devido a problemas de logística interna, que ocorreram 37 vezes e totalizaram 28,97 horas. Este tipo de paragem acontece devido à falta de matérias-primas essenciais para o processo, como papel, cola quente ou cola fria.

Por último, houve sete pausas para almoço, com um total de 3,79 horas. Este pequeno número de pausas para almoço deve-se ao facto de os operadores normalmente deixarem a máquina a funcionar automaticamente sem supervisão enquanto estão a almoçar.

3.3.1.1 Cálculo dos tempos associados a paragens

A Tetra Pak Tubex Portugal opera 24 horas por dia, 7 dias por semana. Para manter os equipamentos em atividade sem interrupções, o dia é dividido em três turnos. O primeiro turno começa às 07:00 horas e termina às 15:00 horas, o segundo turno inicia-se às 15:00 horas e termina às 23:00 horas e, por último, é feito um turno das 23:00 horas às 07:00 horas do dia seguinte. Cada operador tem direito a um intervalo de 30 minutos para o almoço e dois intervalos de 15 minutos durante o turno para descansar ou ir à casa de banho.

Cada operador recebe especialização para trabalhar com uma máquina específica da linha de produção, e durante o seu turno, cada operador é responsável por apenas uma das máquinas da linha de produção.

A análise do desempenho da linha objeto de estudo começa com o cálculo dos tempos associados às paragens na linha laranja. Na Tabela 3.3, é possível observar o Tempo Total de observação (TT), o Tempo de Paragens Próprias (TPP), o Tempo de Paragens Induzidas (TPI) e o Tempo Não Requerido (TNR).

Tabela 3.3 - Tempos de paragem da linha laranja.

Tempos de paragem	Março (h)	Abril (h)	Maio (h)	Junho (h)	Julho (h)	Total (h)
TT	480	600	688	688	720	3176
TPP	164,3	108,26	272,18	113,23	142,15	800,12
TPI	0,69	0	6,45	7,74	14,1	28,98
TNR	39,27	42,36	26,58	55,62	40,22	204,05

A partir dos tempos da Tabela 3.3, é possível calcular o Tempo Requerido (TR) com a Equação 3.1 e o Tempo de Funcionamento (TF) com a Equação 3.2:

$$TR = TT - TNR \quad (3.1)$$

$$TF = TR - TPI - TPP \quad (3.2)$$

O cálculo do TR e TF para cada mês foi refletido na Tabela 3.4:

Tabela 3.4 - Cálculo do TR e TF para cada mês

Mês	TR (h)	TF (h)
Março	440,73	275,74
Abril	557,64	449,38
Maio	661,42	382,79
Junho	632,38	511,41
Julho	679,78	523,53
Total	2971,95	2142,85

Através da Tabela 3.4, é possível obter os valores de 2971,95 horas de TR e 2142,85 horas de TF.

Durante o período em análise, a linha laranja registou um tempo total de observação de 3176 horas, sendo que o tempo de paragens próprias foi de 800,12 horas (25%), o tempo de paragens induzidas foi de 28,98 horas (1%), e o tempo não requerido foi de 204,05 horas (6%). O tempo de funcionamento foi de 2142,85 horas, o que representa 68% do tempo total de produção da fábrica.

3.3.1.2 Análise do desempenho da linha de produção

Com base nos dados apresentados na Tabela 3.4, o próximo passo envolve o cálculo da Disponibilidade operacional (Equação 2.1), que representa a porção de tempo em que a linha de produção funciona sem problemas quando necessária para produzir. De seguida, é calculada a probabilidade de a manutenção feita num dos equipamentos demorar o tempo estabelecido para esse efeito, denominada Disponibilidade própria (Equação 2.2).

O valor da Disponibilidade operacional (Equação 2.1) e Disponibilidade própria (Equação 2.2) é o seguinte:

$$Do = \frac{TF}{TR} = \frac{2142,85}{2971,95} \times 100 = 72,10\% \quad (2.1)$$

$$Dp = \frac{TF}{TF + TPP} = \frac{2142,85}{2142,85 + 800,12} \times 100 = 72,81\% \quad (2.2)$$

Através da Disponibilidade própria, é possível calcular a Indisponibilidade própria da linha laranja com recurso à Equação 3.3.

$$Ip = 1 - Dp = 0,2718 \quad (3.3)$$

Onde:

Ip – Indisponibilidade própria

A Disponibilidade induzida do sistema é calculada através da Equação 2.3.

$$Di = \frac{TR - TPI}{TR} = \frac{2971,95 - 28,98}{2971,95} \times 100 = 99,02\% \quad (2.3)$$

É possível calcular a Indisponibilidade induzida a partir da Disponibilidade induzida, pois estas são complementares entre si. A Equação 3.4 permite calcular a Indisponibilidade induzida.

$$Ii = 1 - Di = 0,0097 \quad (3.4)$$

Onde:

Ii – Indisponibilidade induzida

É possível concluir que a linha laranja estava disponível, isto é, a produzir sem problemas, durante 72,10% do tempo requerido, e indisponível 27,18% do tempo por causa de paragens próprias e 0,97% devido a paragens induzidas. Em resumo, 28,15% do tempo de produção foi desperdiçado.

A Tabela 3.5 apresenta o número de palhinhas produzidas em boas condições e aquelas que foram produzidas com defeitos durante o período em análise.

Tabela 3.5 - Número de palhinhas produzidas durante o período em análise.

Mês	Número de palhinhas fabricadas em boas condições	Número de palhinhas fabricadas com defeito	Total
Março	43912000	2311158	46223158
Abril	33264000	1750737	35014737
Maio	24640000	1296842	25936842
Junho	40480000	2130526	42610526
Julho	33396000	1757684	35153684
Total	175692000	9246947	184938947

O Tempo de ciclo corresponde ao tempo que a linha de produção leva para produzir um produto, desde o início do processo até ao produto final, incluindo tempos de espera e pausas necessárias para a produção. Em condições reais, cada máquina produz a uma velocidade inferior para a qual foi programada.

O tempo de produção efetivo corresponde ao Tempo de ciclo real (Equação 2.9), o qual pode ser obtido a partir dos valores da Tabela 3.5.

$$T_{cm} = \frac{TF}{NPR} = \frac{2142,85}{184938947} = 1,1586 \times 10^{-5} \text{ horas/palhinha} \quad (2.9)$$

O Tempo de ciclo real é $1,1586 \times 10^{-5}$ horas/palhinha, ou seja, são produzidas 24 palhinhas por segundo. Embora este seja um ritmo de produção elevado, é compreensível dadas as características do produto e do processo.

Por outro lado, o Tempo de ciclo teórico representa o tempo que a linha de produção, segundo o fabricante, demora para produzir o produto sob condições ideais, durante o funcionamento normal da fábrica, sem qualquer problema que afete o desempenho dos equipamentos. Para o sistema de produção em análise, o Tempo de ciclo teórico é de $7,0911 \times 10^{-6}$ horas/palhinha. Em teoria, a linha de produção é capaz de produzir 39 palhinhas por segundo, seguindo todas as normas de funcionamento.

No entanto, o desempenho dos equipamentos depende de vários fatores, tais como o estado de limpeza e a durabilidade das peças. Por esta razão, a linha de produção tem um

Tempo de ciclo real superior ao Tempo de ciclo teórico, uma vez que existe máquinas que interrompem o seu funcionamento várias vezes durante o turno do operador.

Outras razões são, por exemplo, uma paragem para remover as palhinhas encravadas ou para ajustar o alinhamento da tira de papel que força a produção a parar. Este tipo de paragens aumentam a diferença entre o Tempo de ciclo real e o Tempo de ciclo teórico.

A razão entre o tempo do ciclo teórico e o tempo do ciclo real é determinada pelo cálculo do Rendimento da velocidade (Equação 2.8):

$$Rv = \frac{T_{cth}}{T_{cm}} = \frac{7,0911 \times 10^{-6}}{1,1586 \times 10^{-5}} = 0,612 \quad (2.8)$$

A produção total de palhinhas durante o período em análise foi de 184938947 palhinhas. Sem paragens próprias, este valor teria sido ainda mais elevado.

A Equação 3.5 permite calcular o número de palhinhas adicionais que se perderam nas 635,82 horas de paragens próprias.

$$\frac{635,82 \text{ h} \times 1 \text{ palha}}{1,1586 \times 10^{-5} \text{ h/palha}} = 69054460 \text{ palhinhas} \quad (3.5)$$

Tendo em conta o Tempo de ciclo real, teria sido possível produzir 69054460 palhinhas caso não tivessem existido 635,82 horas de paragens próprias.

De seguida, é calculada a Produtividade operacional, através da Equação 2.6:

$$Po = \frac{NPR}{TR} = \frac{184938947}{2531,22} = 73063 \text{ palhinhas/hora} \quad (2.6)$$

A linha laranja tem uma capacidade produtiva de 73063 palhinhas por hora.

Ao analisar a Tabela 3.5, que tem os valores das palhinhas fabricadas em boas condições e palhinhas fabricadas com defeitos, é possível extrair o valor do NPB (175692000 palhinhas) e do NPR (184938947 palhinhas). Com estes valores, é calculada a Taxa de qualidade através da Equação 2.5.

$$Tq = \frac{NPB}{NPR} = \frac{175692000}{184938947} = 0,95 \quad (2.5)$$

Por último, ao utilizar os valores obtidos anteriormente, é possível calcular o Rendimento operacional (Equação 2.12).

$$Ro = Do \times Rv \times Tq = 0,721 \times 0,612 \times 0,95 = 0,419 \quad (2.12)$$

O Rendimento operacional da linha de produção em análise, a linha laranja, é de 0,419.

3.3.2 Análise da fiabilidade: Sistema reparável

A próxima etapa da análise estatística do equipamento em estudo, a máquina de formação de tubos de papel, tem como objetivo refletir sobre a fiabilidade do equipamento, com o intuito de identificar as principais falhas do sistema, analisar a sua gravidade, frequência e duração, assim como obter o MTBF mínimo do sistema, de forma a determinar o tempo previsto entre interrupções.

As falhas identificadas na máquina de formação de tubos de papel durante o estudo são responsáveis pela redução da produção e produtividade, resultando numa baixa fiabilidade devido às frequentes paragens do equipamento. Assim, a melhoria da fiabilidade é fundamental para aumentar a capacidade da máquina para desempenhar o seu papel de forma consistente (Kumar *et al.*, 2022).

É de extrema importância compreender quais são as principais razões para o tempo de inatividade do equipamento. A análise das falhas permite identificar as interrupções que causam as maiores perdas no processo. Com esta informação, a equipa de manutenção consegue formular um plano de manutenção capaz de mitigar as principais falhas e assim reduzir a sua frequência e duração.

3.3.2.1 Análise da evolução da taxa de falhas

Com o intuito de descobrir a tendência dos tempos entre falhas, recorreu-se ao teste de Laplace para testar a existência de um PPH e assim descobrir se a taxa de falhas é constante ou apresenta uma tendência.

O teste de Laplace, define-se através das seguintes hipóteses:

H_0 : A taxa de falhas é modelada por um PPH;

H_1 : A taxa de falhas é modelada por um PPNH.

Tendo em consideração que o estudo está limitado pelo espaço temporal definido para análise e recolha de dados referentes à máquina de formação de tubos para realizar o estudo, determinou-se o valor de Z_0 com recurso à Equação 2.18.

Considerando um nível de significância de 10%, foi definido o $Z_{crítico}$.

$$|Z_{crítico}| = \left| Z_{\frac{\alpha}{2}} \right| = |Z_{0,05}| = 1,64$$

Tendo em conta os dados recolhidos durante o período em análise, procedeu-se à construção da Tabela 3.6 com os parâmetros necessários à aplicação do teste de Laplace.

Tabela 3.6 - Parâmetros utilizados para o cálculo do teste de Laplace.

Parâmetros da Máquina de formação do tubo	
n_f	5986
T (Horas)	3176
α	0,10
$\sum_{i=1}^{n_f} \tau_i$	9526443

Os dados da Tabela 3.6 permitem calcular o valor de Z_0 , através da Equação 2.18:

$$Z_0 = \sqrt{12 \times n_f} \times \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_f} \tau_i}{n_f \times T} - 0,5 \right] = 0,29 \quad (2.18)$$

Pode-se verificar, para um nível de significância de 10%, que o valor de Z_0 é 0,29. Uma vez que $|Z_0|$ está dentro do intervalo de confiança, isto é, $|Z_0| = 0,29$ e $Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1,64$, pode-se concluir que $|Z_0| < Z_{\frac{\alpha}{2}}$, logo não se rejeita a hipótese nula. Desta forma, conclui-se que se está perante um PPH com a taxa de falhas constante.

Uma taxa de falhas constante ocorre quando um sistema não acumula danos ao longo do tempo, o desgaste não tem efeito acumulado sobre a taxa de falhas ao longo da vida útil e, portanto, o risco de falha é completamente aleatório.

Para uma melhor interpretação do resultado do teste de Laplace, procedeu-se à construção de um gráfico com o número acumulado de falhas em função do tempo de vida do sistema no momento de ocorrência da falha (Figura 3.15).

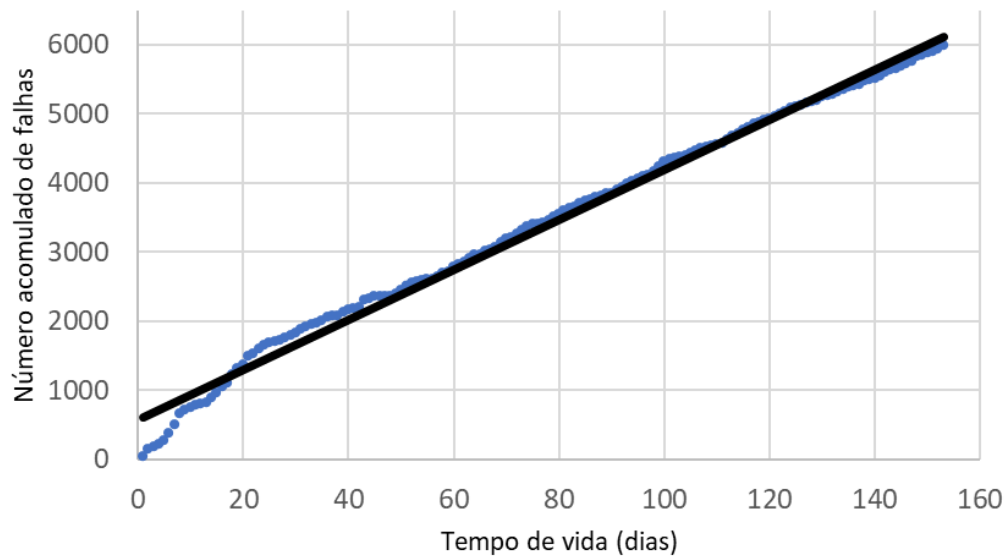


Figura 3.15 - Número acumulado de falhas durante o período em estudo.

A observação da Figura 3.15, permite constatar que é possível ajustar uma reta aos pontos assinalados no gráfico, o que confirma a presença de um PPH e que estamos perante uma taxa de falhas constante.

Dada a tendência identificada, o MTBF é obtido através da Equação 2.13:

$$MTBF = \theta = \frac{\sum TBF}{N} = \frac{3176}{5986} = 0,53 \text{ horas} \quad (2.13)$$

Onde:

N – Número de avarias verificadas no período de tempo considerado

O MTBF do período em análise é de 0,53 horas, ou seja, é previsto uma interrupção do processo a cada 32 minutos.

De seguida, procedeu-se ao cálculo do MTBF mínimo segundo a Equação 2.16, considerando que $x_{\alpha, 2 \times (n_f + 1)}^2$ é igual a 18014,4.

$$\theta_i = \frac{2 \times T}{x_{\alpha, 2 \times (n_f + 1)}^2} = \frac{2 \times 3176}{18014,4} = 0,35 \text{ horas} \quad (2.16)$$

Onde:

T – Tempo total de funcionamento

n_f – Número de falhas

Para um nível de significância de 10%, o valor do MTBF mínimo é de 0,35 horas, ou seja, o sistema deve funcionar sem sofrer interrupções por, pelo menos, 21 minutos para atender ao requisito de MTBF mínimo.

3.3.2.2 Identificação das principais causas de falha

Após estudar o comportamento das falhas das máquinas ao longo do seu tempo de vida, é crucial identificar as principais razões que levam o equipamento a interromper o seu funcionamento.

As falhas podem originar-se por ações do operador ou ocorrer de forma natural, sem intervenção humana. Por esta razão, o sistema instalado na fábrica divide as falhas por classes. Para este estudo, optou-se por agregar todas as falhas, sem separação por classes, devido à relevância de ambas as causas de interrupção para o departamento de manutenção.

De modo a ordenar as principais razões de interrupção do equipamento para lhes dar uma noção de prioridade, foi utilizada a ferramenta diagrama de Pareto, uma ferramenta de análise estatística para o estudo da fiabilidade. Esta ferramenta permite classificar as falhas em ordem decrescente de frequência, proporcionando uma clara priorização para a correção de cada falha.

A análise da representação gráfica das causas de falha torna possível seguir o princípio de Pareto para identificação das falhas com maior impacto no equipamento. A aplicação do princípio de Pareto afirma que para a maioria dos eventos, cerca de 80% dos efeitos vêm de 20% das causas, deste modo, as estratégias de mitigação têm em conta a heurística desta regra e permitem estabelecer uma ordem de prioridade na manutenção de cada falha (Kaur *et al.*, 2018).

A Tabela 3.7 apresenta as principais causas de interrupção da máquina de formação de tubos da linha laranja.

Nesta tabela, estão presentes a frequência de cada interrupção, a duração total devida às interrupções forçadas e a percentagem acumulada da frequência de ocorrência das falhas, que serão utilizadas para uma posterior análise.

Tabela 3.7 - Frequência de interrupções da máquina de formação de tubos.

Causa	Duração (h)	Frequência Absoluta	Frequência Relativa (%)	Percentagem acumulada (%)
Engarrafamento de produto na saída da máquina	74,92	1499	38,08	38,08
Palhinhas encravadas dentro da máquina	28,71	871	22,13	60,21
Especificações do tubo fora dos limites	132,61	768	19,51	79,73
Mudança de correia	140,47	390	9,9	89,63
Rotura da fita de papel	38,28	218	5,54	95,17
Acumulação de cola nos eixos	10,41	64	1,63	96,8
Carrinho de transporte mal posicionado	5,47	51	1,29	98,09
Quebra de um componente	57,66	36	0,92	99,01
Problemas no sistema de limpeza da cola	38,5	16	0,41	99,42
Acumulação de cola no tubo de fornecimento de cola	2,56	13	0,33	99,75
Quebra da faca de corte	0,83	10	0,25	100

A análise da Tabela 3.7 revela que as principais causas de interrupção do equipamento em estudo.

As principais causas são o "Engarrafamento de produto na saída da máquina", com 1499 ocorrências e uma duração total de 74,92 horas, em segundo lugar, as "Palhinhas encravadas dentro da máquina", com 871 ocorrências e uma duração total e o terceiro motivo de interrupção foram as "Especificações do tubo fora dos limites", com 768 ocorrências e uma duração total de 132,61 horas. No total, estas três causas de interrupção representam 79,73% das razões de falha do equipamento.

A construção do diagrama de Pareto utilizou os dados recolhidos automaticamente pelos sensores que monitorizam os KPI's do equipamento da Tabela 3.7. É possível retirar conclusões através da interpretação gráfica do diagrama de Pareto, representado na Figura 3.16.

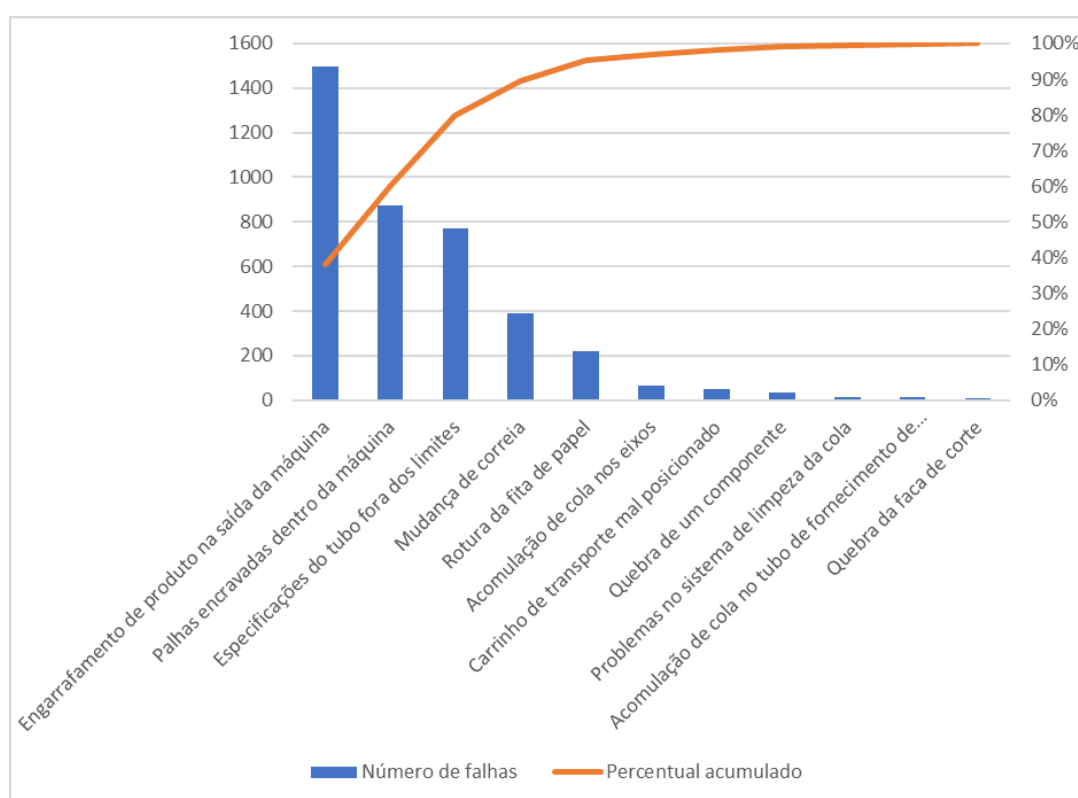


Figura 3.16 - Diagrama de Pareto do número de falhas da máquina em análise.

A Figura 3.16 evidencia graficamente as interrupções críticas que afetam significativamente a produtividade do processo da máquina de formação de tubos de papel.

Ao aplicar o princípio de Pareto, que afirma que 80% das falhas vêm de 20% dos tipos de falha, consegue-se identificar que cerca de 79,73% do tempo de paragem acumulado está relacionado com três causas específicas, o "Engarrafamento de produto na saída da

máquina", as "Palhinhas encravadas dentro da máquina" e as "Especificações do tubo fora dos limites".

No entanto, é importante notar que, ao considerar apenas as frequências das interrupções, não é possível avaliar a gravidade de cada causa, uma vez que algumas falhas podem causar um tempo de paragem mais longo do que outras, mesmo que ocorram com menos frequência.

A Tabela 3.8 apresenta os dados necessários para o novo diagrama de Pareto.

Tabela 3.8 - Duração das interrupções da máquina de formação de tubos.

Causa	Frequência Absoluta (h)	Frequência Relativa (%)	Percentagem acumulada (%)
Mudança de correia	140,47	26,48	26,48
Especificações do tubo fora dos limites	132,61	25	51,48
Engarrafamento de produto na saída da máquina	74,92	14,12	65,6
Quebra de um componente	57,66	10,87	76,47
Problemas no sistema de limpeza da cola	38,5	7,26	83,73
Rotura da fita de papel	38,28	7,22	90,95
Palhinhas encravadas dentro da máquina	28,71	5,41	96,36
Acumulação de cola nos eixos	10,41	1,96	98,32
Carrinho de transporte mal posicionado	5,47	1,03	99,35
Acumulação de cola no tubo de fornecimento de cola	2,56	0,48	99,83
Quebra da faca de corte	0,83	0,17	100

Os dados da Tabela 3.8 foram utilizados para produzir o novo diagrama de Pareto que compara a duração das interrupções da máquina de formação de tubos.

Na Figura 3.17 é apresentado o diagrama de Pareto do tempo total de interrupção das principais causas de interrupção da máquina de formação de tubos da linha laranja.

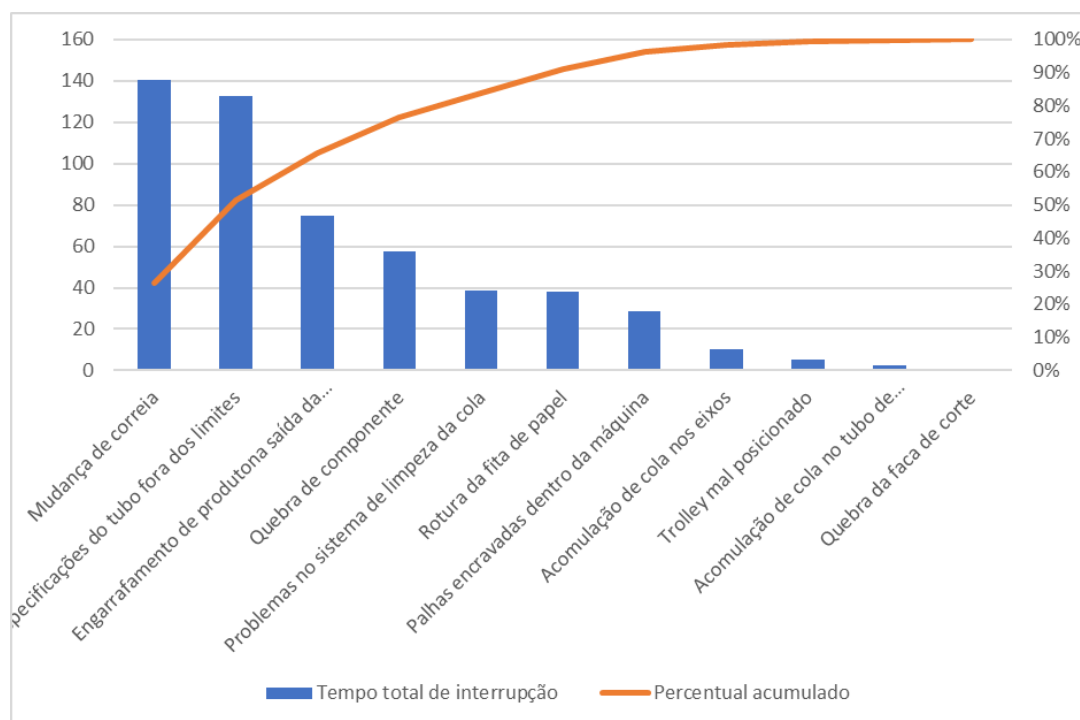


Figura 3.17 - Diagrama de Pareto do tempo total de interrupção das falhas.

A Figura 3.17 segue a lógica de que, além de abordar a frequência das principais causas identificadas pelo princípio de Pareto, é crucial realizar uma análise mais aprofundada sobre impacto real da duração de cada interrupção na eficiência da linha de produção. Este enfoque permitiu uma abordagem mais precisa na priorização das melhorias e na redução do tempo de paragem.

Ao analisar o diagrama de Pareto da Figura 3.17, é revelado que a maioria das interrupções é causada por apenas algumas das causas de interrupção. Neste caso, a mudança de correia e especificações do tubo fora dos limites foram as principais causas de interrupção, contribuindo com aproximadamente 26,48% e 25% do tempo total de paragem, respetivamente. Isto destaca a necessidade de dar atenção especial a estas áreas para melhorar a eficiência da linha de produção.

Ao aplicar o princípio de Pareto aos dados da Figura 3.17, é possível identificar que cerca de 76,47% das interrupções são causadas pelas quatro principais razões, ou seja, a mudança de correia, as especificações do tubo fora dos limites, o engarrafamento de produto na saída da máquina e a quebra de um componente.

Porém, as restantes causas de paragem têm uma frequência próxima da quarta causa. Por isso é possível incluir os problemas no sistema de limpeza de cola, a rotura da fita de papel e as palhinhas encravadas dentro da máquina como causas a serem analisadas de forma a diminuir a sua frequência.

Ao serem direcionados esforços de melhoria das quatro principais causas de interrupção, é possível obter melhorias significativas na redução do tempo de paragem e no aumento da eficiência da linha de produção.

3.4 Propostas de melhoria

O presente subcapítulo apresenta propostas de melhoria para os problemas identificados ao longo do estudo de caso. As propostas de melhoria foram elaboradas tendo como objetivo a melhoria da produtividade não só da linha de produção em análise, mas também das restantes linhas de produção que integram a fábrica Tetra Pak Tubex Portugal.

Implementação de uma matriz de riscos

Em primeiro lugar, é proposto a implementação de uma matriz de riscos de forma a diferenciar o impacto da falha de cada um dos componentes dos equipamentos. Esta abordagem define o risco através do cruzamento da probabilidade de ocorrer uma falha, com o impacto que a falha tem na produção.

Exemplos de consequências para a produção devido a falhas são:

- Paragem de produção;
- Consequências para a saúde, segurança e ambiente;
- Produção de um lote com produtos defeituosos;
- Qualidade dos produtos comprometida;
- Aumento dos custos de produção;
- Redução da capacidade produtiva.

A matriz de risco ajuda a identificar e controlar a magnitude do risco, simplificando a monitorização de falhas durante a produção. É particularmente útil em ambientes de trabalho em equipa, facilitando o acompanhamento dos técnicos de manutenção definir e priorizar as ações a tomar.

A matriz de risco tem diferentes tipos de categorias de gravidade, estes são, favorável, aceitável, tolerável, insatisfatório e crítico, por ordem crescente de gravidade. A seleção da categoria da gravidade é influenciada por vários fatores. Estes fatores são calculados e somados para determinar a categoria da probabilidade, classificada numa escala de 1 a 5, onde 1 representa a probabilidade mais baixa de falha e 5 indica a probabilidade mais alta. Simultaneamente, a categoria de consequência é avaliada numa escala de A (consequência mais baixa) a E (consequência mais alta). Após o cálculo das categorias para os diferentes tipos de falhas dos componentes, é atribuído um nível de risco correspondente.

A Figura 3.18 representa uma ilustração visual da matriz de riscos.

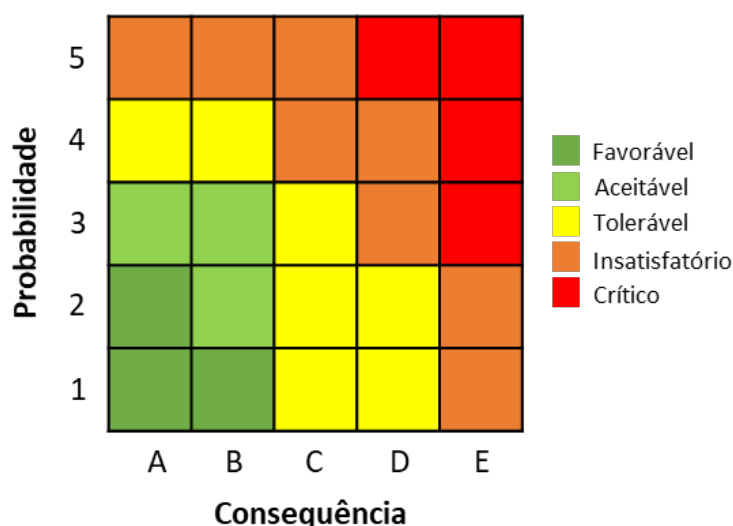


Figura 3.18 - Matriz de riscos.

Implementação de um sistema de registo de falhas global

É proposto a melhoria do registo de falhas dos equipamentos na fábrica com o objetivo de tornar este processo mais fiável e eficiente. O registo das falhas é utilizado para controlar as causas que levam o equipamento a falhar durante a produção e têm um impacto direto no desempenho e produtividade de toda a linha de produção.

É sugerida a implementação de um sistema de controlo de falhas global a toda a produção. Atualmente, as máquinas registam cada falha numa memória interna, o que pode ser ineficiente e demorado. Com um sistema global, os equipamentos centralizam informações em tempo real, eliminando a necessidade de recolher manualmente dados de cada máquina diariamente. A tarefa de recolha dos KPIs de cada máquina demora em média

48 minutos, com um sistema global que regista automaticamente, este tempo perdido é eliminado.

Deve ser feita a padronização das categorias de falhas e criar códigos específicos para classificar as principais falhas. Esta alteração facilitará a análise posterior e a identificação de tendências na produção, permitindo fazer decisões informadas para as atividades de manutenção.

A priorização automática de falhas com base na sua gravidade e impacto é outra proposta. Esta alteração irá permitir uma melhoria na alocação de recursos para a reparação de equipamentos, garantindo que as falhas mais críticas são tratadas com prioridade, minimizando o seu tempo de inatividade.

Deve ser implementado um sistema para acompanhar o estado de resolução de cada falha, de forma a permitir controlar o progresso de resolução das falhas, incluindo o registo das ações tomadas, custos associados e tempo necessário para a resolução.

Posteriormente, os dados recolhidos devem ser analisados para identificar tendências, problemas recorrentes e áreas de melhoria, com o intuito de permitir a implementação de medidas preventivas eficazes para evitar futuras falhas (Figura 3.19).

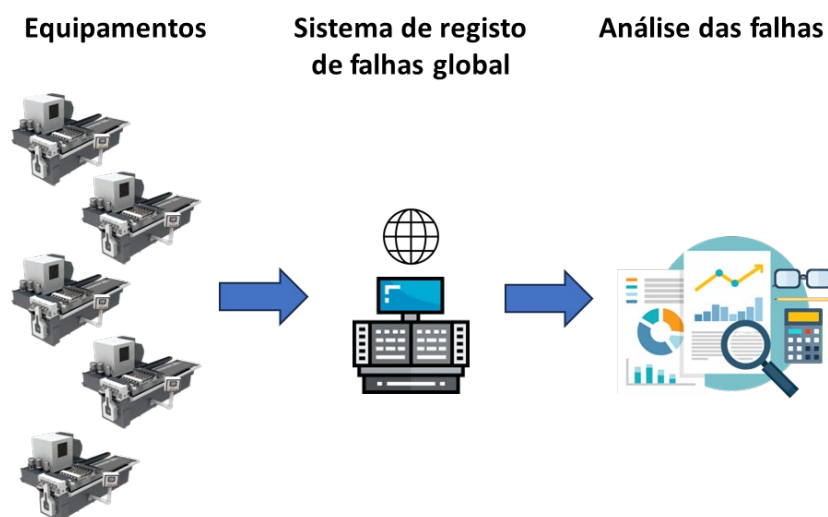


Figura 3.19 - Representação ilustrativa do sistema de registo de falhas global.

Devem ser realizadas auditorias periódicas para garantir a conformidade com os procedimentos de registo de falhas para identificar possíveis oportunidades adicionais de melhoria.

A implementação desta proposta de melhoria permite ao trabalhador responsável pela análise dos KPIs das linhas de produção poupar cerca de 16 horas por mês.

Formação específica dos operadores

Esta proposta pretende alertar a organização para se preocupar em aprimorar as capacidades de cada operador, através da implementação de um programa de formação abrangente e prático para todos os colaboradores. O foco desta formação é capacitar os colaboradores a lidar de forma competente com as falhas dos equipamentos, realizar manutenções preventivas e corretivas sem depender exclusivamente da equipa de manutenção, além de assegurar uma afinação precisa da linha de produção, garantindo uma padronização consistente.

A justificação para esta proposta reside nos desafios atuais enfrentados pela fábrica, como por exemplo paragens inesperadas, manutenção inadequada e inconsistências na afinação da linha de produção. Estes problemas resultam em tempo de inatividade não planeado, desperdício de recursos e redução da qualidade dos produtos.

É proposta a criação de um programa de formação personalizado que aborde as necessidades específicas da fábrica, desde a identificação e registo de falhas até a realização de manutenção preventiva e corretiva, bem como a afinação da linha de produção. Este programa será lecionado por formadores qualificados e experientes em manutenção de equipamentos industriais e processos de produção, garantindo uma transmissão eficaz de conhecimentos.

Por exemplo, foi observado uma correlação direta entre o estado de limpeza das máquinas e o número de falhas. O nível de limpeza do equipamento está ligado aos conhecimentos que um operador tem para manter o equipamento em boas condições de funcionamento durante a produção. Um operador que sabe executar as atividades de limpeza corretas têm em média, cerca de menos 17% de interrupções do equipamento durante o seu turno. Por esta razão, caso a organização invista na formação dos trabalhadores será possível diminuir em cerca de 17% o número de interrupções.

A formação deve incluir componentes práticos e simulações para que os operadores adquiram habilidades reais durante o processo de aprendizagem, permitindo que treinem em situações controladas antes de lidar com equipamentos reais. Além disso, será estabelecido um sistema de monitorização e avaliação contínua para acompanhar o progresso dos funcionários, fornecer feedback e identificar oportunidades de melhoria.

A fim de minimizar o impacto na produção, a formação deve ser integrada à rotina de trabalho, com agendamento adequado para garantir que os colaboradores possam aplicar imediatamente as habilidades adquiridas no ambiente de trabalho.

Ao implementar esta proposta de melhoria, prevendo um aumento do nível de formação dos operadores, assim como o aumento da capacidade de limpeza dos equipamentos para diminuir o número de paragens, é previsto uma diminuição de 17% do número de interrupções durante a produção.

Criação de uma lista de regras a seguir em caso de falha

É sugerido à organização, a introdução de uma lista de regras em cada zona de trabalho para orientar os operadores em caso de uma situação de emergência relacionada com uma falha.

Na Tetra Pak Tubex Portugal costumam existir desafios na resposta a falhas nos equipamentos, que frequentemente resultam em paragens não planeadas. A ausência de orientação estruturada muitas vezes leva a abordagens inconsistentes e atrasos na resolução das falhas. Por esta razão, deve ser criada uma lista de regras de forma a ajudar os colaboradores a dar resposta a cada tipo de problema.

Primeiramente, devem ser identificadas as situações de falha, classificando-as por gravidade e impacto na produção através da matriz de risco anteriormente sugerida. Devem ser estabelecidos procedimentos claros de forma a conseguir fazer a notificação imediata, indicando quem deve ser informado e em que ordem.

De seguida, devem ser descritos os passos a serem seguidos para realizar uma avaliação inicial da falha, incluindo a identificação de possíveis causas raiz. A organização deve definir as ações a tomar imediatamente à falha para minimizar os danos e o tempo de inatividade.

De acordo com a gravidade, pode ser necessário envolver a equipa de manutenção, sendo estabelecidos tempos de resposta alvo. Para todas as falhas corrigidas, deve existir documentação completa, incluindo datas, descrições, ações tomadas e resultados.

Quando necessário, devem ser conduzidas análises de causa raiz para evitar recorrências. Devem ser especificados protocolos de comunicação interna e externa para garantir que todas as partes relevantes estão cientes dos diferentes tipos de falhas e as suas resoluções.

A lista de regras a seguir no caso de ocorrer uma falha pode sofrer alterações, para isso deve ser recolhido *feedback* dos colaboradores após a resolução de uma falha.

Reforçar o horário dos técnicos de manutenção

Foram identificados problemas relacionados com a falta de cobertura de equipas de manutenção durante o tempo total de funcionamento da produção, isto porque existe uma ausência de técnicos de manutenção durante os fins de semana e o turno noturno.

Como existe falta de cobertura de equipas de manutenção durante as 24 horas do dia, é recomendada a contratação de técnicos de manutenção para trabalhar durante o turno da noite e fins de semana. Esta contratação extra de colaboradores irá permitir uma assistência contínua, eliminando os atrasos causados pela falta de suporte em horários críticos e minimizando o tempo de inatividade não planeado.

Ao implementar esta proposta de melhoria será possível aumentar o número de horas em que a equipa de manutenção atua de 16 horas para 24 horas, um aumento de 50%.

3.5 Discussão de resultados

A discussão de resultados revela o conjunto de informações retiradas da análise feita sobre as interrupções da linha de produção objeto de estudo, assim como os resultados dos testes estatísticos de fiabilidade no equipamento identificado como ponto crítico.

A análise das interrupções permitiu identificar o ponto crítico da linha de produção, o equipamento de formação dos tubos de papel, que apenas tinha uma disponibilidade de 57% e que apenas existia um equipamento desse tipo em toda a linha de produção. Este valor é muito abaixo em comparação com os restantes equipamentos, que possuem uma maior disponibilidade e uma maior quantidade de equipamentos de cada tipo.

Após selecionar o equipamento que representa o ponto crítico da produção, procedeu-se à análise do seu histórico de interrupções. Ao somar o tempo de paragem associado a cada tipo de interrupção, foi possível tirar conclusões. O histórico revelou que os tipos de paragem com mais frequência foram a "Paragem rápida" com uma frequência de 4347 paragens, a "Paragem automática" com uma frequência de 809 paragens e a "Manutenção planeada" com 439 paragens.

Durante o período em análise, a linha laranja acumulou um tempo total de observação de 3176 horas. Deste tempo, 800,12 horas (25%) correspondem a paragens próprias, enquanto 28,98 horas (1%) foram atribuídas a paragens induzidas e 204,05 horas (6%) equivale ao tempo não requerido. O tempo de funcionamento foi de 2142,85 horas, equivalente a 68% do tempo total de funcionamento.

Com base nos tempos de paragem identificados, foi possível obter a Disponibilidade operacional da linha de produção, que indicou que 72,10% do tempo, a linha de produção funciona sem problemas para o tempo no qual esta é requerida e indisponível 27,18% do tempo por causa de paragens próprias e 0,97% devido a paragens induzidas. Em conclusão, 28,15% do tempo de produção foi desperdiçado.

O tempo de ciclo real determinado permitiu concluir que são produzidas 24 palhinhas a cada segundo. Este valor é bastante alto, mas tendo em conta a dimensão do produto e a velocidade de produção dos equipamentos, este valor é compreensível.

Tendo em conta as paragens que afetam a produção da linha de produção e o número de palhinhas fabricadas com defeitos, é determinar que a linha laranja tem uma capacidade produtiva de 73063 palhinhas por hora.

A análise das interrupções da linha de produção em estudo termina com o cálculo do rendimento operacional da linha laranja, com o valor de 0,419.

A análise da fiabilidade do equipamento revelou que o sistema de formação dos tubos de papel apresenta uma taxa de falhas constante, indicando que o equipamento não acumula danos ao longo do tempo. O cálculo do MTBF resultou em 0,53 horas, o que significa que, em média, ocorre uma interrupção do processo a cada 32 minutos.

Além disso, foi calculado o MTBF mínimo, que corresponde ao tempo mínimo que o sistema deve funcionar ininterruptamente para atender a requisitos específicos. O MTBF mínimo foi calculado em 0,35 horas, representando 21 minutos de funcionamento contínuo.

A análise das principais causas de interrupção revelou que o "Engarrafamento de produto na saída da máquina," "Palhinhas encravadas dentro da máquina," e "Especificações do tubo fora dos limites" foram as principais razões para as falhas do equipamento. Estas três causas representaram 79,73% do tempo total de paragem.

Em suma, a análise das interrupções e da fiabilidade do equipamento de formação dos tubos de papel fornece uma visão abrangente dos desafios enfrentados pela fábrica. Com base nesta análise, a equipa de manutenção pode formular um plano de ação direcionado para mitigar as principais causas de interrupção e melhorar o desempenho geral da linha de produção.

As propostas de melhoria, em caso de implementação integral, preveem uma diminuição de 17% do número de interrupções durante a produção com o aumento do nível de formação dos operadores, a poupança de 16 horas por mês do trabalhador responsável pela análise dos KPIs das linhas de produção e um aumento de 50% da disponibilidade da equipa de manutenção.

CONCLUSÕES

Este capítulo final pretende refletir sobre as conclusões relevantes para o estudo realizado, expondo os resultados obtidos ao longo do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

4.1 Conclusões gerais

O presente estudo teve como objetivo identificar as principais causas de falha da linha de produção, avaliar o desempenho dos ativos, efetuar uma análise da fiabilidade do equipamento considerado como ponto crítico e elaborar propostas de melhoria da gestão da manutenção atualmente praticada na fábrica.

Iniciou-se a abordagem pela caracterização do processo de fabrico da palhinha de papel, incluindo uma análise da gestão da manutenção praticada. Foi possível concluir que o conjunto de rotinas e procedimentos de manutenção eram seguidos tanto por operadores, responsáveis apenas por um equipamento durante a produção, como também um grupo de técnicos de manutenção mais especializado. A observação das atividades de manutenção, permitiu constatar que existia uma correlação direta entre a manutenção preventiva praticada num equipamento com o seu número de interrupções.

A produção na fábrica da Tetra Pak Tubex Portugal é feita numa linha de produção, onde os equipamentos estão posicionados sequencialmente e uma interrupção tem efeitos negativos nas etapas que se procedem. Por esta razão, foi fundamental identificar o ponto crítico da linha de produção, que após uma análise da disponibilidade de cada equipamento, permitiu identificar o equipamento responsável pela formação do tubo como gargalo do processo. O estudo sobre os principais tipos de paragens que afetam o equipamento

permitiu concluir que os principais problemas do equipamento eram relacionados com a acumulação excessiva de cola, tubos encravados e tiras de papel desalinhadas.

O cálculo dos tempos associados a paragens demonstrou que a linha de produção em análise estava disponível 72,10% do tempo requerido. O objetivo da análise da linha de produção foi alcançado com a determinação do rendimento operacional, com o valor de 0,419.

A avaliação da evolução da taxa de falhas deu início à análise da fiabilidade. O teste de Laplace determinou que o sistema reparável em estudo tinha uma taxa de falhas modelada por um PPH, que corresponde a uma taxa de falhas constante. O que indica que o sistema não acumula danos ao longo do tempo, ou seja, o desgaste não tem efeito acumulado sobre a taxa de falhas ao longo da vida útil do equipamento. Os testes estatísticos foram concluídos com o cálculo do MTBF mínimo, o período mínimo no qual o sistema deve funcionar sem sofrer interrupções, neste caso, para um nível de significância de 10%, pelo menos 21 minutos para atender ao requisito de MTBF mínimo.

O estudo sobre as principais causas de falha permitiu refletir sobre os diferentes tipos de problemas que afetam o equipamento definido como ponto crítico. Através do princípio de Pareto, as causas de falha foram ordenadas de forma a identificar as causas com maior impacto. As conclusões deste estudo permitiram identificar a mudança de correia e as especificações do tubo de papel fora dos limites como as principais causas de interrupção da produção, que no total representavam respetivamente, 51,48% e 26,48% do tempo total de paragem.

As propostas de melhoria foram desenvolvidas com base nas observações feitas durante o estudo e conclusões do estudo sobre as principais causas de falha. É sugerido à organização como proposta de melhoria o reforço do horário dos técnicos de manutenção de forma a poder aumentar em 50% a disponibilidade da equipa de manutenção, aumento do nível de formação porque foi possível concluir que equipamentos operados por trabalhadores menos experientes tinham um maior número de interrupções, implementação de um sistema global a toda a fábrica para controlar os KPIs de todos os equipamentos e fazer automaticamente uma análise do desempenho de toda a produção, a implementação de uma matriz de risco para ordenar os tipos de falhas em cada componente por impacto na produção e a criação de uma lista de regras a seguir em caso de falha.

As melhorias propostas pretendem promover a melhoria contínua dos processos de produção e das atividades de gestão de manutenção da empresa.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base na análise efetuada neste estudo, sugerem-se várias linhas de investigação para trabalhos futuros. Estas sugestões têm como objetivo beneficiar a fábrica ao melhorar a eficiência da linha de produção e a fiabilidade dos equipamentos.

Recomenda-se que a organização utilize este estudo como ponto de partida para realizar estudos complementares em áreas da produção com maior necessidade de melhoria. Este tipo de estudos permitem aprofundar a compreensão das operações e identificar oportunidades de melhoria adicionais.

Além da análise de fiabilidade realizada neste estudo, é aconselhado que a fábrica conduza o mesmo tipo de análise para os restantes equipamentos presentes na linha de produção.

Dado que a maioria das paragens durante o período analisado resultou de falhas na mudança de correia e especificações do tubo fora dos limites, é crucial implementar um plano de manutenção preventiva focado nesse tipo de falhas. Este plano deve-se focar na limpeza regular e afinação correta dos equipamentos presentes na linha de produção, de modo a reduzir os tempos de indisponibilidade.

Um aspeto relevante a explorar pela direção da fábrica é o cálculo dos custos associados às perdas de produção. Quantificar estes custos facilitará a priorização das propostas de melhoria, ajudando a determinar quais áreas devem receber atenção prioritária.

Para complementar o estudo de fiabilidade, é aconselhado realizar uma análise financeira que inclua todo o tipo de custos associados às interrupções da produção. Esta análise permitirá uma avaliação mais precisa do impacto financeiro de cada uma das melhorias propostas.

BIBLIOGRAFIA

Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: Literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(7), 709–756. <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>

Alazemi, A. S. K. R. Q., Ali, M. Y., & Daud, M. R. C. (2019). Preventive Maintenance of Boiler: A Case of Kuwait Industry. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 4(2), 48–58. <https://doi.org/10.26776/ijemm.04.02.2019.02>

Alizon, F., Shooter, S. B., & Simpson, T. W. (2009). Henry Ford and the Model T: Lessons for product platforming and mass customization. *Design Studies*, 588–605. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.03.003>

Alrabghi, A., Tiwari, A., & Savill, M. (2017). Simulation-based optimisation of maintenance systems: Industrial case studies. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.05.008>

Ansell, J. I., & Phillips, M. J. (1989). Practical Problems in the Statistical Analysis of Reliability Data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 205–231. <https://doi.org/10.2307/2348057>

Carvalho, M. A. dos S. (2019). *Proposta de Modelo para a Melhoria Contínua das Atividades de Gestão da Manutenção* [Master Thesis]. <https://run.unl.pt/handle/10362/96115>

Chaves, S., & Campello, M. (2016). A qualidade e a evolução das normas série ISO 9000. *Gestão pela qualidade*, 3, 19–34. <https://doi.org/10.5935/978-85-7042-002-2.2018B001>

Chen, L., Cheng, C., Dui, H., & Xing, L. (2022). Maintenance cost-based importance analysis under different maintenance strategies. *Reliability Engineering & System Safety*, 222, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108435>

Çolak, A. B., Sindhu, T. N., Lone, S. A., Shafiq, A., & Abushal, T. A. (2023). Reliability study of generalized Rayleigh distribution based on inverse power law using artificial neural network with Bayesian regularization. *Tribology International*, 185, 108544. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108544>

Coulibaly, S., Kouam, P., & Page, M. (2001). Organisation de la maintenance préventive en milieu hospitalier. *ITBM-RBM*, 22(2), 125–133. [https://doi.org/10.1016/S1297-9562\(01\)90038-5](https://doi.org/10.1016/S1297-9562(01)90038-5)

Daniyan, I., Mpofu, K., Muvunzi, R., & Uchegbu, I. D. (2022). Implementation of Artificial intelligence for maintenance operation in the rail industry. *Procedia CIRP*, 109, 449–453. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.277>

Daniyan, I., Mpofu, K., Oyesola, M., Ramatsetse, B., & Adeodu, A. (2020). Artificial intelligence for predictive maintenance in the railcar learning factories. *Procedia Manufacturing*, 45, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.032>

Dui, H., Liu, M., Song, J., & Wu, S. (2023). Importance measure-based resilience management: Review, methodology and perspectives on maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 109383. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109383>

Errandonea, I., Alvarado, U., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2022). A Maturity Model Proposal for Industrial Maintenance and Its Application to the Railway Sector. *Applied Sciences*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/app12168229>

Fanini, L., & Guittard, A. (2021). On single use plastic straws: Pre-ban findings on touristic beaches in Crete. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112790. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112790>

Formentini, G., Favi, C., Moroni, F., & Pirondi, A. (2021). Engineering design in food-packaging industry: The case study of a tuna canning machine. *Procedia CIRP*, 100, 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.060>

Fotovاتفard, A., & Heravi, G. (2021). Identifying key performance indicators for healthcare facilities maintenance. *Journal of Building Engineering*, 42, 102838. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102838>

González-Crespo, S., & Vazquez, J. M. (2017). Ford Motor Company in Cadiz 1929-1923. *Procedia Manufacturing*, 13, 1397–1404. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.150>

Gonzalo, A., Benmessaoud, T., Entezami, M., & García Márquez, F. P. (2022). Optimal maintenance management of offshore wind turbines by minimizing the costs. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102230>

Groumpos, P. P. (2021). A Critical Historical and Scientific Overview of all Industrial Revolutions. *IFAC-PapersOnLine*, 54(13), 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.492>

Guizzi, G., Falcone, D., & De Felice, F. (2019). An integrated and parametric simulation model to improve production and maintenance processes: Towards a digital factory performance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106052. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106052>

Haddad, T., & Jaaron, A. (2012). The Applicability of Total Productive Maintenance for Healthcare Facilities: An Implementation Methodology. *International Journal of Business, Humanities and Technology*, 2, 148.

Hashemian, H. M. (2011). Wireless sensors for predictive maintenance of rotating equipment in research reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 38(2–3), 665–680. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.09.012>

Hsieh, T. J. (2023). Performance indicator-based multi-objective reliability optimization for multi-type production systems with heterogeneous machines. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, 108970. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108970>

Ingemarsdotter, E., Kambanlou, M. L., Jamsin, E., Sakao, T., & Balkenende, R. (2021). Challenges and solutions in condition-based maintenance implementation - A multiple case study. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126420>

Klutke, G. A., Kiessler, P. C., & Wortman, M. A. (2003). A critical look at the bathtub curve. *IEEE Transactions on Reliability*, 52(1), 125–129. <https://doi.org/10.1109/TR.2002.804492>

Korchagin, A., Deniskin, Y., Pocebneva, I., & Vasilyeva, O. (2022). Lean Maintenance 4.0: Implementation for aviation industry. *Transportation Research Procedia*, 63, 1521–1533. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.164>

Lambán, M., Morella, P., Royo, J., & Carlos Sánchez, J. (2022). Using industry 4.0 to face the challenges of predictive maintenance: A key performance indicators development in a cyber physical system. *Computers & Industrial Engineering*, 171, 108400. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108400>

Lin, Y. K., & Chang, P. C. (2013). Reliability-based performance indicator for a manufacturing network with multiple production lines in parallel. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.11.006>

Liu, J., Zhuang, X., & Pang, H. (2022). Reliability and hybrid maintenance modeling for competing failure systems with multistage periods. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 68, 103254. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2022.103254>

Luxhøj, J. T., Riis, J. O., & Thorsteinsson, U. (1997). Trends and perspectives in industrial maintenance management. *Journal of Manufacturing Systems*, 16(6), 437–453. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(97\)81701-3](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(97)81701-3)

Montoille, L., Morales Vicencio, C., Fontalba, D., Ortiz, J. A., Moreno-Serna, V., Peponi, L., Matiacevich, S., & Zapata, P. A. (2021). Study of the effect of the addition of plasticizers on the physical properties of biodegradable films based on kefir for potential application as food packaging. *Food Chemistry*, 360, 129966. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129966>

Moreno, L., & Morcillo, A. (2019). *Teste de Hipóteses*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10524.85128>

Moutinho, J., & Oliveira, F. (2015). Optimizing Maintenance Processes On Customer Site In A Decentralized Organization Based On Multi-site Teams. *International Journal for Quality Research*, 9(1).

Neto, A., Gomes, T., Pertel, M., Vieira, L., & Pacheco, E. (2021). An overview of plastic straw policies in the Americas. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 112813. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112813>

Pinto, G., Silva, F. J. G., Baptista, A., Fernandes, N. O., Casais, R., & Carvalho, C. (2020). TPM implementation and maintenance strategic plan – a case study. *Procedia Manufacturing*, 51, 1423–1430. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.198>

Poór, P., Basl, J., & Zenisek, D. (2019). Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development. *2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*, 245–253. <https://doi.org/10.23919/SCSE.2019.8842659>

Puig, P., & Stephens, M. A. (2000). Tests of Fit for the Laplace Distribution, With Applications. *Technometrics*, 42(4), 417–424. <https://doi.org/10.1080/00401706.2000.10485715>

Sahli, A., Evans, R., & Manohar, A. (2021). Predictive Maintenance in Industry 4.0: Current Themes. *Procedia CIRP*, 104, 1948–1953. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.329>

Salzano, A., Parisi, C. M., Acampa, G., & Nicolella, M. (2023). Existing assets maintenance management: Optimizing maintenance procedures and costs through BIM tools. *Automation in Construction*, 149, 104788. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104788>

Sami, M. A., & Khan, T. A. (2023). Forecasting failure rate of IoT devices: A deep learning way to predictive maintenance. *Computers and Electrical Engineering*, 110, 108829. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108829>

Singh, R., Gohil, A. M., Shah, D. B., & Desai, S. (2013). Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study. *Procedia Engineering*, 51, 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.084>

Soares, E., Lopes, I. da S., & Pinheiro, J. (2021). Methodology to Support Maintenance Management for the Identification and Analysis of the Degradation of Equipment Reliability. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 1272–1277. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.153>

Song, M., Zhang, X., & Lind, M. (2023). Automatic identification of maintenance significant items in reliability centered maintenance analysis by using functional modeling and reasoning. *Computers & Industrial Engineering*, 182, 109409. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109409>

Syamsundar, A., Naikan, V. N. A., & Wu, S. (2021). Estimating maintenance effectiveness of a repairable system under time-based preventive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107278. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107278>

Tetra Pak. (2023). Tetra Pak processing and packaging solutions for food and beverages. Consultado em 17 de Agosto de 2023. Disponível em <https://www.tetrapak.com/>

Tortorella, G. L., Fogliatto, F. S., Cauchick-Miguel, P. A., Kurnia, S., & Jurburg, D. (2021). Integration of Industry 4.0 technologies into Total Productive Maintenance practices. *International Journal of Production Economics*, 240, 108224. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108224>

Triska, Y., Sousa Agostino, Í. R., Penna, P. M., Braghirolli, L. F., & Frazzon, E. M. (2021). Integrated production and maintenance planning method with simulation-based optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 349–354. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.160>

Trojan, F., & Marçal, R. (2017). Proposal of Maintenance-types Classification to Clarify Maintenance Concepts in Production and Operations Management. *Journal of Business Economics*, 8(7). [https://doi.org/10.15341/jbe\(2155-7950\)/07.08.2017/005](https://doi.org/10.15341/jbe(2155-7950)/07.08.2017/005)

Wu, H., Xu, Y., Liu, Z., Li, Y., & Wang, P. (2023). Adaptive Machine Learning with Physics-based Simulations for Mean Time to Failure Prediction of Engineering Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 109553. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109553>

Zhang, W., & Xu, J. (2022). Advanced lightweight materials for Automobiles: A review. *Materials & Design*, 221, 110994. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>

Zhao, M., & Xie, M. (1996). On Maximum Likelihood Estimation for a General Non-Homogeneous Poisson Process. *Scandinavian Journal of Statistics*, 23(4), 597–607.

Zheng, Y., & Zhang, Y. (2023). Reliability analysis for system with dependent components based on survival signature and copula theory. *Reliability Engineering & System Safety*, 238, 109402. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109402>

Zheng, Y., Zhang, Y., & Lin, J. (2023). System reliability analysis for independent and nonidentical components based on survival signature. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 73, 103466. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103466>

Zhou, X., Xi, L., & Lee, J. (2007). Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(4), 530–534. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.01.006>



MELHORIA
DA
GESTÃO
DE MANUTENÇÃO

DIOGOMOTA
2023