

Manutenção *Lean* em Ambiente de Indústria 4.0

David Samuel Fernandes Tavares Mendes

Tese para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia e Gestão Industrial
(3^o ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Miguel de Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar
Coorientadora: Prof^a. Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas

Junho de 2024

Provas públicas realizadas em 28 de Maio de 2024

Composição do júri

Presidente

Doutor Joaquim Mateus Paulo Serra

Vice-Reitor da Universidade da Beira Interior

Vogais

Doutor António João Marques Cardoso

Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior

Doutor José Manuel Torres Farinha

Professor Coordenador Principal do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Doutora Isabel da Silva Lopes

Professora Auxiliar da Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Doutor Pedro Miguel de Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar

Professor Auxiliar com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade da
Beira Interior

Doutora Tânia Daniela Felgueiras de Miranda Lima

Professora Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior

Declaração de Integridade

Eu, David Samuel Fernandes Tavares Mendes, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição D2903 do curso Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 03/06/2024

Agradecimentos

A chegada a esta etapa do meu percurso académico contou com o apoio de várias pessoas. Deste modo quero agradecer:

Ao Professor Pedro Gaspar, pela orientação e ajuda prestada, bem como pelos conhecimentos transmitidos, que foram essenciais para a conclusão da presente tese.

À Professora Helena Navas, pelo incentivo, sugestões, acompanhamento e tempo despendido ao longo da realização da presente tese.

Ao Professor Fernando Charrua-Santos, pela acessibilidade e tempo disponibilizado ao longo desta etapa.

Quero também agradecer à empresa Manutenção Industrial, Montagens e Engenharia, Lda., pela oportunidade, assim como por todo apoio e suporte dado ao longo dos trabalhos realizados, e em particular ao Engenheiro Luís Baptista por toda a ajuda que proporcionou ao longo do desenvolvimento da presente tese, assim como na partilha de conhecimentos.

Resumo

Para que as empresas, independentemente da sua dimensão, se mantenham competitivas e ativas num mercado cada vez mais global, devem aumentar a produtividade, economizar recursos e melhorar os seus processos organizacionais. Com o aumento da automação e digitalização, um dos focos é colocado na gestão de ativos e manutenção, como sendo funções de agregação de valor ainda mais significativas.

Os requisitos para o setor da manutenção, assim como para o pessoal integrante desta área, mudou consideravelmente ao longo dos anos por causa do aumento da digitalização e automação, e pela complexidade dos ativos. Para que esta área se enquadre na realidade atual, é necessária uma rápida reação e adaptação da estratégia de manutenção.

Desta forma, o incremento das ferramentas inerentes à Filosofia *Lean* (FL) e às tecnologias inerentes à Indústria 4.0 (I4.0) são de todo importantes, já que permitiram às empresas melhorar o funcionamento do chão de fábrica. A FL surge como uma cultura promissora e geradora de resultados efetivos, tendo como objetivo a eliminação dos desperdícios e a criação de valor. Ligada à FL, assim como ao departamento da manutenção e produção, encontra-se a metodologia *Total Productive Maintenance* (TPM). Esta tem como objetivo potenciar o desempenho das empresas, através da realização de ações específicas, na contribuição para o aumento da eficiência produtiva, diminuição de desperdício, acidentes, defeitos, paragens e falhas ao longo do processo produtivo. Por outro lado, com a introdução de novas tecnologias no setor industrial, surge a necessidade deste se adaptar às alterações do mercado, de modo a fazer frente às necessidades de um mercado cada vez mais competitivo e global.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um modelo que integra três conceitos: Manutenção, FL e a I4.0, para melhorar a gestão e todas as atividades inerentes da manutenção, passando pelo planeamento da manutenção até à intervenção da mesma.

O modelo é composto por uma arquitetura constituída por sensores, *gateway*, e protocolos de comunicação: internet sem fios e o *Bluetooth Low Energy* (BLE) para assegurar a contínua e ininterrupta monitorização de vários indicadores relevantes da manutenção.

Uma vez desenvolvido o modelo, e de forma a ilustrar o seu potencial em termos de aplicação e de validação em contexto industrial e real, é desenvolvido um estudo de caso numa fábrica de rações, mais concretamente aplicado a um tapete transportador que opera na área de transporte e movimentação de granéis.

Constatou-se que a implementação deste modelo junto com a consciencialização e participação de todos os elementos que operam na área de transporte e movimentação de rações, trouxe inúmeros benefícios, como: o aumento da disponibilidade (aumento de funcionamento em 7%), melhoria no conhecimento e desempenho dos colaboradores que operam nesta área, intervenções e plano de manutenção mais ajustado à realidade diária de operação do tapete transportador, melhorando os tempos (redução do tempo médio de reparações em 53%) de paragens programadas, entre outros benefícios.

Os resultados mostram que o modelo proposto é uma ferramenta com mais-valias para as empresas. Possibilita aos responsáveis pelos serviços da manutenção fundamentarem as suas decisões com base na análise de dados que podem ser visualizados de uma forma rápida e acessível. Com base na análise do histórico do tapete transportador conjugado com os dados adquiridos pelo sistema de monitorização contínua, foi possível observar a sua utilidade no dia-a-dia dos responsáveis da manutenção, através da seleção e utilização de parâmetros específicos da gestão da manutenção.

Palavras-chave

Manutenção; Gestão da Manutenção; Filosofia *Lean*; Indústria 4.0; Monitorização em tempo real; Manutenção Produtiva Total.

Abstract

For companies, regardless of their size, to remain competitive and active in an increasingly global market, they must increase productivity, save resources, and improve their organizational processes. With the increase in automation and digitalisation, one of the focuses is on asset management and maintenance as even more significant value-adding functions.

The requirements for the maintenance sector, as well as for maintenance personnel, have changed considerably over the years due to the increase in digitalization and automation, and the complexity of assets. For this area to fit into today's reality, a rapid reaction and adaptation of the maintenance strategy is required.

In this way, the increase in the tools inherent in the Lean Philosophy (LPL) and the technologies inherent in Industry 4.0 (I4.0) are important, as they have enabled companies to improve the way their shop floors work. The LP has emerged as a promising culture that generates effective results, with the aim of eliminating waste and creating value. Linked to LP, as well as to the maintenance and production department, is the Total Productive Maintenance (TPM) methodology. Its aim is to boost company performance by carrying out specific actions to help increase production efficiency, reduce waste, accidents, defects, stoppages, and failures throughout the production process. On the other hand, with the introduction of new technologies in the industrial sector, there is a need to adapt to market changes to meet the needs of an increasingly competitive and global market.

In this context, this paper presents a model that integrates three concepts: Maintenance, FL and I4.0, to improve management and all the activities inherent in maintenance, from maintenance planning to maintenance intervention.

The model consists of an architecture made up of sensors, a gateway, and communication protocols: wireless internet and Bluetooth Low Energy (BLE) to ensure continuous and uninterrupted monitoring of various relevant maintenance indicators.

Once the model has been developed, and to illustrate its potential in terms of application and validation in a real industrial context, a case study is carried out in a feed mill, more specifically applied to a conveyor belt that operates in the area of bulk transport and handling.

It was found that the implementation of this model, together with the awareness and participation of all elements operating in the area of transport and movement of feed, brought numerous benefits, such as: increased availability (increased operation by 7%), improvement in knowledge and performance of employees who operate in this area, interventions and maintenance plan more adjusted to the daily reality of conveyor belt operation, improving times (reduction in average repair time by 53%) of scheduled stops, among other benefits.

The results show that the proposed model is a tool with added value for companies. It enables those responsible for maintenance services to base their decisions on the analysis of data that can be visualized quickly and accessibly. By analyzing the conveyor belt's history combined with the data acquired by the continuous monitoring system, it was possible to see how useful it can be in the day-to-day work of maintenance managers, through the selection and use of specific maintenance management parameters.

Keywords

Maintenance; Maintenance management; Lean philosophy; Industry 4.0; Real-time monitoring; Total productive Maintenance.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
<i>Abstract</i>	ix
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Nomenclatura	xix
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Enquadramento e Objetivos	1
1.2. Justificação e Importância do Tema a Desenvolver	7
1.3. Metodologia	9
1.4. Estrutura da Tese	10
Capítulo 2	13
Fundamentos Teóricos: Manutenção	13
2.1. Evolução Histórica da Manutenção	13
2.2. Definição e Tipos de Manutenção	16
2.3. Objetivos e Funções Manutenção	20
2.4. Gestão da Manutenção	21
2.5. Níveis da Manutenção	22
2.6. Custos de Manutenção	23
2.7. Modelos de Gestão da Manutenção	25
2.7.1. <i>Total Productive Maintenance</i>	25
2.7.2. <i>Reliability Centred Maintenance</i>	31
2.8. Normalização da Manutenção	34
Capítulo 3	37
Filosofia <i>Lean</i>	37
3.1. Origem e Conceitos	37
3.2. Ferramentas da Filosofia <i>Lean</i> , Qualidade e Outras Ferramentas de Apoio	41
3.3. Principais Indicadores a Utilizar na Aplicação do Modelo	44

3.4. Gestão da Manutenção <i>Lean</i>	46
3.4.1. Princípios da Gestão da Manutenção <i>Lean</i>	47
3.4.2. Desperdícios na Manutenção	49
Capítulo 4	53
Indústria 4.0	53
4.1. Caracterização da Indústria 4.0	53
4.2. Os Pilares da Indústria 4.0	54
4.3. Princípios da Indústria 4.0	58
4.4. Interação entre a Indústria 4.0 e a Filosofia <i>Lean</i>	60
4.5. Interação entre a Indústria 4.0 e a Manutenção	63
Capítulo 5	67
Modelos de Integração da Manutenção, Filosofia <i>Lean</i> e Indústria 4.0: Revisão Sistemática da Literatura	67
5.1. Enquadramento	67
5.2. Metodologia de Pesquisa	68
5.3. Análise da Revisão Sistemática de Literatura	69
5.4. Análise dos Modelos Existentes que Integram a Manutenção, Filosofia <i>Lean</i> e a Indústria 4.0	70
5.5. Nota Conclusiva	80
Capítulo 6	83
Proposta de um Modelo de Melhoria da Gestão da Manutenção Através da Filosofia <i>Lean</i> e a Indústria 4.0	83
6.1. Descrição do Modelo Proposto	83
6.2. Funcionamento do Modelo Proposto e sua Monitorização	91
6.3. Componentes do Sistema de Monitorização	94
6.4. Introdução da <i>Total Productive Maintenance</i> no Modelo Proposto	95
6.4.1. Implementação do TPM	95
6.5. Nota Conclusiva	98
Capítulo 7	101
Estudo de caso: Melhoria do Desempenho de um Tapete Transportador Através da Filosofia <i>Lean</i> e Indústria 4.0	101
7.1. Manutenção Industrial, Montagens e Engenharia, Lda.	101
7.2. Implementação do Modelo	102

7.2.1. Melhoria Focada	107
7.2.2. Manutenção Autônoma	109
7.2.3. Manutenção Planeada	111
7.2.4. Formação e Treino	112
7.2.5. Gestão Precoce do Equipamento	113
7.2.6. Integração da Qualidade	113
7.2.7. TPM na Administração	114
7.2.8. Segurança, Saúde e Ambiente	114
7.3. Nota Conclusiva	115
Capítulo 8	117
Discussão de Resultados e Limitações	117
8.1. Discussão de Resultados	117
8.2. Limitações	125
8.3. Nota Conclusiva	127
Capítulo 9	129
Conclusões	129
9.1. Conclusões	129
9.2. Sugestões de Pesquisa e Trabalhos Futuros	132
Referências	135
Apêndice A	173
A.1. Modelos já Existentes com a Interação dos Tópicos: Manutenção e Filosofia <i>Lean</i> e Indústria 4.0	173
Apêndice B	181
B.1. Etapas de Implementação da Metodologia TPM	181
B.2. Folha Lição Ponto a Ponto	184
B.3. Etiquetas Utilizadas na Manutenção Autônoma	185
B.4. Plano de Manutenção Autônoma Desenvolvido para o Tapete Transportador	186
B.5. Plano de Manutenção Preventiva Desenvolvido para o Tapete Transportador	187

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Classificação dos diferentes Tipos de Manutenção	17
Figura 2.2 – Classificação dos diferentes Tipos de Manutenção incluindo a Manutenção de Melhoria	19
Figura 2.3 – “Iceberg” dos custos	25
Figura 2.4 – 8 Pilares do TPM	27
Figura 2.5 – Seis grandes perdas associadas ao OEE	30
Figura 2.6 – Etapas de implementação da RCM	34
Figura 3.1 – Casa TPS	40
Figura 3.2 – Sete princípios da ML	49
Figura 4.1 – Os 9 Pilares da Indústria 4.0	55
Figura 6.1 – Arquitetura proposta para a melhoria contínua das atividades da gestão da manutenção	85
Figura 6.2 – Implementação da MA,.....	89
Figura 6.3 – Proposta do modelo de aplicação que combina os conceitos de Manutenção, Filosofia <i>Lean</i> e Indústria 4.0	91
Figura 6.4 – Monitorização de tempo de paragens, tempo de funcionamento, total de peças com e sem defeitos	92
Figura 6.5 – Interface do <i>Gateway</i> com a camada Nuvem	92
Figura 6.6 – Fluxograma da descrição do funcionamento do sistema	93
Figura 6.7 – Arquitetura de comunicação de dispositivos com o ThingSpeak	95
Figura 6.8 – Fluxograma da descrição do funcionamento do sistema (Continuação)	97
Figura 7.1 – Tapete transportador	102
Figura 7.2 – Modelo adaptado ao estudo de caso	103
Figura 7.3 – Diagrama de conexão elétrica realizado no painel elétrico	104
Figura 7.4 – Fluxograma que descreve o funcionamento do sistema proposto	106
Figura 7.5 – Diagrama de Pareto – Análise dos principais modos de falha	108
Figura 7.6 – Excerto do Plano da Manutenção preventiva	112

Figura 8.1 – Comparação de tempo útil de trabalho, tempo de inatividade, tempo médio de operação e reparação	120
Figura 8.2 – Comparação das ocorrências nas semanas de observação	122
Figura 8.3 – Distribuição das horas de reparação por semana de observação	122
Figura 8.4 – Tempo útil de trabalho, tempo de inatividade, tempo médio de operação e reparação após os pilares MA e MP	123
Figura 8.5 – Representação esquemática do MTBF através do sistema de monitorização	124
Figura B.2 – Exemplo da Folha Lição Ponto a Ponto utilizada	184
Figura B.3 – a) Etiqueta vermelha técnico de manutenção; b) Etiqueta azul operador	185
Figura B.4 – Plano de Manutenção Autónoma	186
Figura B.5 – Plano de Manutenção Preventiva	187

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Tabela resumo das ferramentas da Filosofia <i>Lean</i> e outras ferramentas de apoio	42
Tabela 3.2 – Tabela resumo das ferramentas da Filosofia <i>Lean</i> e outras ferramentas de apoio (cont.)	43
Tabela 3.3 – Tabela resumo das ferramentas da Filosofia <i>Lean</i> e outras ferramentas de apoio (cont.)	44
Tabela 5.1 – Tabela resumo das 26 publicações analisadas	71
Tabela 5.2 – Tabela resumo das 26 publicações analisadas (cont.)	72
Tabela 5.3 – Tabela resumo das 26 publicações analisadas (cont.)	73
Tabela 5.4 – Tabela resumo das 26 publicações analisadas (cont.)	74
Tabela 8.1 – Registo das paragens do tapete transportador (durante 2 h)	119
Tabela A.1 – Tabela resumo dos modelos já existentes de aplicação conjunta dos três conceitos	174
Tabela B.1 – Doze etapas de implementação da metodologia TPM	181

Nomenclatura

Geral:

t	Tempo, [s];
T	Temperatura, [K ou °C];

Acrónimos:

3D	Tridimensional;
5W2H	<i>Five W and Two How;</i>
ADKAR	<i>Awareness, Desire, Knowledge, Ability, Reinforcement;</i>
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation;</i>
APMI	Associação Portuguesa de Manutenção Industrial;
BLE	<i>Bluetooth Low Energy;</i>
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System;</i>
CPS	<i>Cyber-Physical System;</i>
EAT	<i>Estimated Actual Total;</i>
EN	<i>European Norm;</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning;</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transformation;</i>
FL	Filosofia <i>Lean</i> ;
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis;</i>
I4.0	Indústria 4.0;
IE	Interferência eletromagnética;
IoS	<i>Internet of Service;</i>
IoT	<i>Internet of Things;</i>
JIT	<i>Just – in – Time;</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators;</i>
Lda.	Limitada;
LI4.0	<i>Lean e Indústria 4.0;</i>
LPP	Lição Ponto a Ponto;
LSM	<i>Lean Smart Maintenance;</i>
MA	Manutenção autónoma;
MI4.0	Manutenção e Indústria 4.0;
MIME	Manutenção Industrial, Montagens e Engenharia;
ML	Manutenção e <i>Lean</i> ;
MLI4.0	Manutenção <i>Lean</i> e Indústria 4.0;

MP	Manutenção Planeada;
MRO	<i>Maintenance, Repairs and Operating Supplies;</i>
NP	Norma Portuguesa;
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness;</i>
PDCA	<i>Plan – Do – Check – Action;</i>
PME	Pequena Média Empresa;
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance;</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification;</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura;
SF	<i>Smart Factories;</i>
SMED	<i>Single minute Exchange of Die;</i>
TI	Tecnologia de Informação;
TPM	<i>Total Productive Maintenance;</i>
TPS	<i>Toyota Production System;</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping.</i>

Capítulo 1

Introdução

No primeiro capítulo apresenta-se o enquadramento do trabalho desenvolvido e a definição dos objetivos da presente tese. Nas seções seguintes é ainda apresentada, a justificação e importância da temática a ser estudada, a metodologia e a estrutura da tese.

1.1. Enquadramento e Objetivos

Fruto da globalização, os mercados atuais, estão cada vez mais competitivos, as empresas dependem diretamente da sua capacidade de adaptação, habilidade e rapidez de inovar para se poderem manter competitivas e manter-se nos mercados (Gopalakrishnan *et al.*, 2022; Si *et al.*, 2022).

Portanto, as empresas procuram novas formas de gestão, através da implementação de novas e inovadoras metodologias e/ou ferramentas, assim como, empenhar esforços nas áreas que estão dentro do seu controlo, que permitam melhorar os seus orçamentos anuais nas diversas áreas que operam no seio destas, como a manutenção e todas as atividades relacionadas com o sistema produtivo (Martinetti *et al.*, 2021; Algabroun *et al.*, 2022).

Desta forma, a manutenção, torna-se essencial para qualquer tipo, dimensão e área empresarial que pretenda ser competitiva, o mais rentável possível e com menos custos associados (Abbas & Shafiee, 2020; Velmurugan *et al.*, 2022).

A Função manutenção tem evoluído em larga escala ao longo dos últimos anos, principalmente no desenvolvimento de várias estratégias de gestão, de modo a alcançar uma maior segurança, um menor impacto ambiental e uma melhor qualidade dos produtos e serviços a baixo custo (Amrani *et al.*, 2022; Majdouline *et al.*, 2022).

A manutenção, tem ganho cada vez maior importância, já que, o panorama atual obriga os responsáveis pela manutenção a procurarem novas ferramentas, metodologias e técnicas para melhorarem a gestão, assim como o tempo e a qualidade de cada intervenção, de modo a irem ao encontro dos objetivos gerais da empresa (Guo *et al.*, 2019; Yunusa-Kaltungo & Labib, 2021).

Assim, a manutenção contribui agora mais do que nunca, para se alcançar os objetivos das empresas pela integração total do processo de produção, reduzindo ao mínimo as perdas de produção quer por avarias, paragens forçadas ou por falhas na produção, ajudando deste modo a melhorar a eficiência, produtividade e qualidade do sistema produtivo. Contudo, esta pode influenciar nos fatores competitivos das empresas, de forma positiva ou negativa, caso não seja levada em conta e não se tenha uma gestão eficiente e eficaz de acordo com as necessidades da mesma (Narayanan & Sreekumar, 2022; Tortorella *et al.*, 2022).

Desta forma, as empresas e os responsáveis de manutenção procuram adotar metodologias que lhes permitam alcançar e superar as metas e objetivos a que se propõem, bem como a se distinguirem e sobreporem aos seus concorrentes. Neste sentido, a Filosofia *Lean* (FL), surge como modelo promissor e gerador de resultados efetivos (Deuse *et al.*, 2020; Singh, 2021; Nounou *et al.*, 2022).

A FL tem como objetivo fazer cada vez mais com cada vez menos, ou seja, utilizando menos equipamentos, menos esforço humano, menos espaço e tempo, busca aproximar-se cada vez mais dos seus clientes, oferecendo-lhes exatamente o que eles desejam, no tempo certo. Por outro lado, a FL implica alterações profundas no modelo organizacional e produtivo das empresas, mas também implica uma mudança de mentalidade. Para que a FL seja bem-sucedida, as empresas devem atender aos principais requisitos estratégicos desta filosofia como o compromisso da gestão, autonomia dos funcionários, transparência de informação e ajuste cultural (Maware & Adetunji, 2019; Mohammadi *et al.*, 2022).

Por outro lado, a evolução de novas tecnologias e a sua introdução nos processos de produtivos está a transformar a indústria, levando as empresas a adaptarem os seus processos como forma de se destacarem no mercado, obtendo assim vantagens competitivas duradoras para se diferenciarem perante os seus concorrentes. É a partir destas estratégias que o processo da Indústria 4.0 (I4.0) tem vindo a ganhar maior destaque, sendo também denominada como a quarta revolução industrial. Esta fundiu as novas tecnologias e inovações de forma muito mais rápida e ampla do que nas revoluções anteriores, caracteriza-se por proporcionar a criação de novos sistemas de fabrico virtuais e físicos, possibilitando fábricas inteligentes (Kääriäinen *et al.*, 2020; Chugh *et al.*, 2022).

As fábricas inteligentes ou *Smart Factories*, como parte da I4.0, são cada vez mais complexas em termos de equipamentos tecnológicos, manutenção e controlo de

processos de fabrico em geral. O ambiente dinâmico leva a uma adaptação dos processos de manutenção e assim como de quase todos os aspetos organizacionais (Nota *et al.*, 2021; Corbally & Malekjafarian, 2021).

Em virtude do que foi mencionado, a monitorização das máquinas e equipamentos é essencial para que as empresas acompanhem a revolução industrial em curso e para que os seus gestores de manutenção e processos produtivos possam tomar decisões corretas e possam atingir os seus objetivos (Di Bona *et al.* 2021; Salmasnia *et al.*, 2022).

Os processos de decisão, na gestão da manutenção, que tem como foco definir práticas benéficas para assegurar o bom funcionamento das máquinas e equipamentos constituintes no sistema produtivo, dependem diretamente da informação no qual os decisores se baseiam. Estas informações podem ser retiradas quer do histórico de avarias como da monitorização, que após o seu tratamento e análise, pode ser transformada em indicadores úteis para melhorar a tomada de decisão, podendo contribuir para um aumento do desempenho dos ativos constituintes do chão de fábrica, mas também da área da manutenção (Gonçalves *et al.*, 2015; Netto *et al.*, 2015; Tsao *et al.*, 2020).

No entanto, a forma que por vezes se tenta compilar ou obter essa informação é por meio de observação direta, visitas regulares, registo dos tempos de ciclo, tempos de paragem, e outros indicadores, quando ou após uma intervenção da manutenção. Apesar desta recolha contribuir para melhorar o desempenho do departamento da manutenção assim como do sistema produtivo, por vezes esta recolha ou não é feita devidamente, ou atempadamente, e estes dados por uma razão ou por outra acabam por não ser bem contabilizados ou conter outros erros de leitura ou de contagem (Taggart *et al.*, 2019; Mičičeta *et al.*, 2022).

É importante referir, para que os dados recolhidos, tratados e analisados tenham resultados positivos, é de extrema importância dispor de informação completa e homogénea, assim como devidamente escolhida. Sendo relevante que, para além da informação completa, homogénea e devidamente selecionada e rigor indispensável à inserção da informação no sistema, uma descrição ou classificação que o operador possa partilhar no momento exato em que ocorre essa mesma falha, pode ser determinante para uma rápida perceção e atuação por parte da manutenção (Toazza *et al.*, 2015; Pires & Okada, 2020).

Relativamente a alguns trabalhos realizados que relacionam os conceitos da Manutenção com a FL, Ribeiro *et al.* (2017) apresentaram uma proposta para melhorar a gestão e as atividades inerentes da Manutenção por meio da Gestão Visual, com o objetivo de melhorar as atividades de manutenção de uma refinaria de alumina por meio da aplicação dos conceitos da Manutenção *Lean* (ML), verificou-se que aplicar técnicas de melhoria contínua, mais concretamente a técnica de Gestão visual, conseguiu-se alcançar melhorias operacionais bem como na área de gestão por meio da aplicação da referida metodologia. Pelo estudo pode-se concluir ainda que a manutenção aliada à FL tem uma mais-valia. Deste modo, é de destacar o aumento do valor agregado em todas as tarefas abrangidas por esta filosofia bem como o melhoramento ao nível competitivo da empresa, pois esta conseguiu alcançar melhores níveis de competitividade.

Mostafa *et al.* (2015) num trabalho realizado com o objetivo de identificar e documentar estratégias e atividades de manutenção e desenvolver uma proposta de um esquema para a implementação da ML. Através do estudo realizado pelos autores verificaram que para melhorar o desempenho da manutenção nas empresas deveriam de implementar a ML, pois esta filosofia iria trazer como resultado o aumento da disponibilidade, fiabilidade da unidade fabril, especialmente se esta for caracterizada por uma produção contínua. Concluíram ainda que para implementar o esquema proposto seria mais eficaz se este for aliado a ferramentas de melhoria contínua tais como o *Just – in – Time* (JIT), *Total Productive Maintenance* (TPM), 5S, entre outras.

Mouzani & Bouami (2019) realizaram um estudo onde pretendiam melhorar o desempenho do sistema produtivo através da utilização dos princípios e ferramentas da ML e realizar a comparação entre a ML, TPM e Produção *Lean*. Pelo trabalho chegaram à conclusão de que a ML visa identificar e eliminar as fontes de desperdício em todas as atividades de manutenção de forma a proporcionar uma melhoria real do sistema de produção e que as ferramentas de melhoria contínua devem ser as mais indicadas para cada problema em questão.

Bulatović & Durovic (2014) num estudo realizado sobre a ML verificaram que esta aliada à metodologia 5S tem grandes benefícios. Pelo estudo para além dos benefícios também concluíram que a ferramenta de melhoria contínua 5S é uma das mais importantes quando se quer implementar a ML, pois as empresas não conseguem chegar à manutenção de classe mundial sem a implementação desta ferramenta. Em resumo, com a implementação bem-sucedida resultará numa redução significativa de materiais e espaço necessário para as atividades e operações existentes, já que melhora

as condições de trabalho e iniciativa dos trabalhadores para melhorar a produtividade, reduzir o desperdício e as falhas assim como o tempo de inatividade de outros equipamentos. No que se refere à manutenção os autores referem que esta aliada à FL tem grandes benefícios.

De Silva *et al.* (2012) num trabalho realizado com o objetivo de identificar os desafios da ML e analisar o seu impacto em termos de valores monetários na manutibilidade de um edifício, chegou à conclusão que foi reduzido 40% no custo de manutenção, portanto este conceito pode ser promovido com a abordagem de melhorar a manutenção dos edifícios.

Baluch *et al.* (2012) num artigo em que abordaram a ligação entre o TPM e a ML, referem que esta última, não é um subconjunto nem o desdobramento da FL, em vez disso, é uma condição para o sucesso para qualquer empresa. Também referem que o TPM aliado à ML contribui significativamente para o bom sucesso da mesma, e ainda pelo estudo, verifica-se que a união destas metodologias contribui para redução e/ou eliminação do tempo de produção perdido por falhas nas máquinas.

Clarke *et al.* (2010) num estudo realizado para reduzir a atividade de manutenção sem valor agregado e os seus custos inerentes na indústria farmacêutica, evidenciou-se que com aplicação da ML conseguiu-se remover as atividades sem valor agregado através de um processo estruturado baseado no risco. Com a introdução da FL na manutenção reduziu-se em cerca de 22% o número horas-homem necessário, fazendo com que houvesse mais disponibilidade por parte dos colaboradores da manutenção para apoiar outros projetos ou realizar outras tarefas onde este recurso é mais necessário. Também pelo estudo observaram que com a introdução da manutenção autónoma fez com que o ponto descrito anterior fosse mais facilmente atingido. Para além destas melhorias alcançadas, a introdução do *Single Minute Exchange of Die* (SMED) permitiu alcançar uma redução em cerca de 25% dos tempos de inatividade pela simplificação das tarefas de *Setup*.

Quanto à interação da Manutenção com o conceito da Indústria 4.0, Ashjaei & Bengtsson (2017) desenvolveram um sistema para melhorar a gestão da manutenção. Este, permite recolher a informação por meio de sensores que estão acoplados nos ativos físicos. A informação recolhida é enviada e analisada, onde com recurso a um computador, *tablet* ou qualquer outro dispositivo com acesso à internet, facilita a visualização e o acompanhamento. Também permite emitir alertas na área da manutenção, o que contribui para melhorar o desempenho desta área.

Por outro lado, Islas *et al.* (2019) desenvolveram um protótipo para realizar a monitorização em tempo real de fornos de fundição, visto que é um processo delicado e tem causado alguns problemas nesta fase do processo produtivo. Por meio do incremento das tecnologias facilitadoras da I4.0 e uma plataforma IoT, a área da manutenção tem conseguido atuar de forma mais célere, pois é alertada por meio de um e-mail, quando existe uma anomalia nos fornos.

No que diz respeito à interligação dos três conceitos: Manutenção, FL e I4.0, nota-se que existe um elevado interesse sobre a combinação dos referidos temas quer academicamente em trabalhos teóricos, assim como em estudos práticos quanto aos benefícios de aplicação conjuntas destes três conceitos.

Kinz *et al.* (2016) desenvolveram um modelo de manutenção inteligente para melhorar a gestão de ativos, denominado por *Lean Smart Maintenance* (LSM). Este modelo, permite uma gestão de manutenção mais inteligente com o foco na melhoria. Com o contributo da FL e a I4.0, os autores salientam que é possível melhorar a gestão dos ativos críticos, incidindo e alocando devidamente os recursos contribuindo para que as empresas com orçamentos limitados possam identificar quais são os ativos críticos que devem ser alvo de uma maior análise e acompanhamento.

Maier *et al.* (2020), por outro lado, recorreram ao modelo anterior LSM e aplicaram a três casos de uso diferentes, em três empresas distintas denominadas A, B e C. O modelo permitiu evidenciar a maturidade de cada uma delas, sendo que a Empresa A e B têm uma maturidade semelhante e a Empresa C uma maturidade global superior.

Neste contexto, é de todo oportuno a conceção de novos e inovadores modelos de gestão, que possibilitem a utilização conjunta dos conceitos em estudo, que sustentem um processo de melhoria contínua para a área da Manutenção, com o objetivo de reduzir desperdícios e de garantir um bom sistema de gestão.

Para tal, o foco da presente tese, é a criação de um modelo que permita melhorar a gestão e todas as atividades respeitantes à área da manutenção, através da utilização conjunta da FL e I4.0, com o objetivo de reduzir desperdícios e de garantir um bom sistema de gestão da manutenção.

Nesta perspetiva de melhoria, o trabalho desenvolvido assenta nos seguintes objetivos:

- (i) Realizar uma revisão sistemática da literatura quanto aos conceitos: Manutenção, FL e I4.0.

- (ii) Identificar qual ou quais são as metodologias e tecnologias mais utilizadas quando aplicados os conceitos em simultâneo ou parcialmente para melhorar a área da manutenção.
- (iii) Analisar os estudos já existentes de aplicação conjunta ou parcial dos três conceitos abordados neste estudo.
- (iv) Propor um modelo que combine os conceitos: Manutenção, FL e I4.0, para melhorar a gestão da manutenção.
- (v) Testar e validar o modelo.

1.2. Justificação e Importância do Tema a Desenvolver

O modelo desenvolvido que integra os conceitos em estudo, torna-se uma ferramenta útil quer para a área da Manutenção como para a área da Produção. Embora, tenha sido concebido para a monitorização dos indicadores mais relevantes da gestão da manutenção, devido à sua versatilidade pode ser utilizado em diferentes domínios, quer ao nível do sistema de produção, indústria ou para a monitorização de diferentes parâmetros pela sua facilidade de adaptação. Apesar de existir um vasto leque de trabalhos científicos sobre os modelos que integram a Manutenção, FL e I4.0 (Apêndice A), nenhum dos estudos analisados ao longo da realização desta tese prestou a atenção adequada a esta integração para a monitorização dos parâmetros mais importantes da gestão da manutenção, mas sim na criação de sistemas preditivos ou somente a introdução de metodologias associadas à FL, isto quer dizer que a investigação disponível sobre a ligação deste três conceitos é ainda relativamente pequena, e precisa de ser amplamente explorada.

Kinz *et al.* (2016) e Maier *et al.* (2020) apresentam e implementam um modelo para melhorar a gestão dos ativos do chão de fábrica, por meio dos três conceitos. Este modelo é de todo importante para melhorar a gestão da manutenção, assim como o desempenho do sistema produtivo. Por outro lado, é relativamente moroso e requer a alocação de vários recursos para o implementar. Primeiramente necessita de uma equipa polivalente constituída por elementos da manutenção, produção, e de outras áreas para realizar a triagem e seleção dos ativos críticos com recurso à metodologia *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Com a avaliação, classificação e a análise de riscos feita, é efetuada a escolha dos ativos para reajustar as atividades de manutenção. Após todo este processo, procede-se à monitorização dos ativos que foram escolhidos previamente, tendo sido assim possível concentrar recursos limitados em ativos críticos, e permitir melhorar o desempenho do sistema produtivo, assim como o

desempenho da manutenção, como na redução de custos associados a esta área (Kinz *et al.*, 2016; Maier *et al.*, 2020).

Ashjaei & Bengtsson (2017) propõem um sistema que interage com os conceitos Manutenção e I4.0. O sistema permite a monitorização da vibração podendo ainda ser introduzida no sistema algumas ações como por exemplo aumento e diminuição da velocidade de rotação de forma remota, contribuindo assim para a redução da vibração. Para além da rede local, este possibilita a interação com elementos externos pela rede de longa distância trazendo mais vantagens.

O protótipo que Islas *et al.* (2019) desenvolveram, apesar de este ter sido projetado para monitorizar a temperatura dos fornos, revelou-se importante para melhorar o desempenho da manutenção. Este sistema pode ser melhorado pela versatilidade e ser aplicado em diferentes contextos industriais, contudo não aborda o conceito da FL.

O sistema proposto por Magadán *et al.* (2020) envolve os conceitos Manutenção e I4.0, sendo este um sistema de fácil implementação e económico no ambiente industrial. Apesar de ser um sistema atrativo em termos económicos, este ainda precisa de ser mais desenvolvido para que seja mais completo, pois necessita da criação de um sistema de deteção automática de anomalias, a rotulação de todos os dados recebidos e armazenados na nuvem, bem como o desenvolvimento de um modelo preditivo para estimar a probabilidade de falha do motor, ajudando para a redução dos custos relacionados com as atividades de manutenção.

Clarke *et al.* (2010), De Silva *et al.* (2012), Baluch *et al.* (2012), Bulatović & Durovic (2014), Mostafa *et al.* (2015), Ribeiro *et al.* (2017), Mouzani & Bouami (2019), relataram que a adoção da FL, ou das suas ferramentas em separado, caso sejam bem implementadas, podem trazer vários benefícios no seio da manutenção. Os autores entre os vários benefícios destacam, a redução significativa de materiais e espaço necessário para as atividades e operações existentes, já que melhora as condições de trabalho e a iniciativa dos trabalhadores para melhorar a produtividade, assim como a redução do desperdício e as falhas, bem como o tempo de inatividade dos equipamentos.

Ashjaei & Bengtsson (2017) e Islas *et al.* (2019), relatam que o incremento das novas tecnologias inerentes à I4.0, possibilitaram aumentar o desempenho do sistema produtivo, como da área da manutenção. Pois a introdução de sistemas de monitorização em tempo real quer dos parâmetros da produção como da manutenção,

possibilitaram uma melhor análise em tempo real do que realmente está a acontecer no chão de fábrica, facilitando a tomada de decisão, sempre que haja necessidade de as realizar, num curto espaço de tempo quando comparado com a realização da aquisição e tratamento dos dados manualmente.

Conforme se pode observar ao longo deste documento, apesar de existirem estudos relativamente aos conceitos (Apêndice A): Manutenção, FL e I4.0, quer em separado, ou na combinação entre estes, ainda existe uma dificuldade em encontrar estudos que integram os três conceitos para melhorar a gestão da manutenção, de modo apoiar os responsáveis da manutenção na tomada de decisão, planeamento entre outras fases tão importantes desta área integrante e cada vez mais fundamental e vital no seio das empresas. Deste modo, é necessário realizar os possíveis para dar continuidade à investigação das sinergias criadas com a aplicação conjunta dos três conceitos em estudo, o que leva à apresentação desta tese e subsequente dos objetivos da mesma.

1.3. Metodologia

Após a definição das premissas e os objetos de estudo da presente tese, é importante definir, assim como detalhar, a estrutura metodológica utilizada de forma a possibilitar a realização da presente tese. Assim, para poder levar a cabo a presente tese, primeiramente foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) relativamente aos conceitos: Manutenção, FL e I4.0, que constituem a base da investigação desenvolvida, com o intuito de compreender e analisar a literatura existente, identificar e analisar os vários modelos já existentes que combinam os conceitos em estudo, bem como suportar a realização do estudo de caso. Sendo que para obter este tipo de informação foram consultadas as seguintes bases de dados: *Google Scholar*, *Science Direct* e *B-on*, bem como a consulta e análise de livros consideráveis no que diz respeito aos temas considerados importantes para a realização da presente tese.

Devido às lacunas identificadas e à ausência de um modelo que integre os três conceitos para melhorar a gestão da manutenção verificadas ao longo da realização da RSL, foi desenvolvido um modelo que relaciona a FL a I4.0 para melhorar a gestão da manutenção. Este baseia-se na metodologia TPM, 5S, Lição Ponto a Ponto (LPP), Diagrama de Pareto, assim como nas tecnologias inerentes à I4.0: sensores, *gateway*, *internet*, *cloud*, entre outros dispositivos. Com o modelo já elaborado, de forma a validar e melhorar este, foi realizado um estudo de caso numa fábrica, por meio dos serviços prestados pela empresa Manutenção Industrial, Montagens e Engenharia, Lda.

Em primeiro lugar, procedeu-se a uma caracterização da empresa e da sua atividade, por meio da recolha de dados, observações diretas do processo, *Gemba Walks*, análise de documentos internos e a realização de sessões de *Brainstorming* com todos os níveis hierárquicos da empresa, desde os diretores aos mecânicos.

Após a caracterização da situação atual, foram identificados e analisados os problemas do processo, as oportunidades de melhoria e as necessidades de satisfação da empresa em questão. Com a análise da informação recolhida, foi adaptado o modelo à realidade da empresa, visto que a identificação destas necessidades permitiu o desenvolvimento de ações de melhoria mais adaptadas e aproximadas às reais necessidades do chão de fábrica.

Seguidamente, foi implementado o modelo proposto, como proposta de melhoria da gestão da manutenção e do sistema produtivo.

Por último, é realizada uma análise e discussão dos resultados obtidos no âmbito das melhorias implementadas, tendo também como análise os indicadores utilizados no presente trabalho.

1.4. Estrutura da Tese

Este documento encontra-se dividido em 9 capítulos. O capítulo 1 é constituído pela introdução, Apresentação e Enquadramento, que serviu de apoio ao desenvolvimento do estudo de caso, objetivos propostos, assim como a metodologia utilizada na presente tese.

No capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos da Manutenção, no qual se inclui a sua evolução histórica, definição e tipos, objetivos e funções. Ainda neste capítulo, aborda-se a gestão da Manutenção e os seus modelos, os níveis da Manutenção, bem como os custos associados à Manutenção.

No capítulo 3, apresenta-se o conceito da FL, as suas definições e conceitos, as principais ferramentas desta Filosofia e outras ferramentas de apoio. Também são abordados os Princípios e desperdícios associados à Manutenção *Lean*. Ainda neste capítulo são apresentados os principais indicadores a utilizar no modelo desenvolvido.

No capítulo 4, é caracterizada a I4.0, apresentando também os seus pilares e princípios. Também é apresentada uma análise do conceito da I4.0 quer seja com a FL ou com a Manutenção.

No capítulo 5, é apresentada a revisão sistemática de literatura (RSL) sobre os conceitos em estudo, que visa identificar os pontos da literatura mais importantes de aplicação destes conceitos em separado, ou em conjunto, assim como os modelos já existentes que integram estes três conceitos. É ainda apresentada a Metodologia de pesquisa, bem como a análise da RSL. Por último, é realizada uma análise dos modelos existentes que integram a Manutenção, FL e a I4.0.

O capítulo 6 apresenta o modelo desenvolvido, a descrição do mesmo, assim como o funcionamento deste, os componentes associados ao sistema de monitorização que compõem o modelo. É ainda abordada a metodologia TPM que, assim como os passos de implementação que complementam o modelo.

No capítulo 7, é apresentado um estudo de caso, onde foi aplicado o modelo. Este foi implementado numa fábrica de rações, mais concretamente a um tapete transportador. Este capítulo pretende dar continuidade aos capítulos anteriores, assim como testar e validar o modelo desenvolvido.

O capítulo 8, Discussão dos resultados e limitações do estudo. Neste capítulo, resume-se os principais resultados obtidos no processo de implementação e validação do modelo no estudo de caso. Por último apresentam-se as limitações do estudo.

Por último, no capítulo 9 intitulado “Conclusão e proposta de trabalhos futuros”, é feita uma análise global, interligando todos os pontos e fases apresentados até ao presente momento. Também é apresentada a proposta de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos: Manutenção

No presente capítulo irá ser apresentado o contexto teórico da Manutenção, incluindo a sua evolução histórica, definição e tipos, objetivos e funções da mesma. Ainda neste capítulo, aborda-se os modelos de gestão da Manutenção, os níveis da Manutenção, custos, e a normalização da Manutenção.

2.1. Evolução Histórica da Manutenção

Com a globalização dos dias de hoje, as empresas dependem cada vez mais da sua flexibilidade e adaptabilidade para melhorarem os seus sistemas produtivos de forma a se poderem enquadrar aos mercados globais (Rachidi *et al.*, 2012; Solberg *et al.*, 2021).

Como resultado, as empresas procuram incessantemente novas formas de gestão através da utilização ou a combinação de métodos, ferramentas e técnicas que as direcionem para uma maior competitividade por meio do aumento da produtividade, assim como da qualidade dos produtos e serviços oferecidos, sendo a manutenção fundamental para atingir tais objetivos (Ebrahimi *et al.*, 2019; Stefani *et al.*, 2021).

A manutenção influencia a eficiência das empresas, tendo maior expressão nas áreas da produção e qualidade. Dada a importância da função da Manutenção no seio das empresas, estas devem procurar novas formas e ferramentas de apoio à gestão e facilitar a inserção destas quer na Manutenção como na empresa em geral tendo como objetivo a melhoria contínua dos processos produtivos (Mehmeti *et al.*, 2018; Coelho *et al.*, 2020).

Contudo, esta visão relativamente à manutenção, foi mudando ao longo dos anos. O conceito “Manutenção” foi evoluindo exponencialmente em consonância com o próprio desenvolvimento industrial das empresas. Com o passar do tempo, este conceito, ganhou crescente importância, tornando-se na sociedade atual fundamental para qualquer empresa (Faccio *et al.*, 2014; Bongomin *et al.*, 2020).

Esta constante evolução provocou entre as empresas uma grande competitividade, fazendo com que a Manutenção passasse de um “mal necessário” a um “bem necessário” porque para além de criar capacidade produtiva, é corresponsável pela

melhoria da mesma nos mais variados domínios, e também pode ser uma função geradora de lucro e não apenas um custo (Poór *et al.*, 2019; Bongomin *et al.*, 2020; Nissoul *et al.*, 2020).

As máquinas e equipamentos são elementos que estão sujeitos ao desgaste e como consequência surge a necessidade da sua manutenção. A abordagem para a manutenção de equipamentos tem mudado ao longo do tempo, já que se evoluiu da reparação após quebra para uma manutenção mais complexa e global em que se monitoriza as máquinas e equipamentos, de forma a prever possíveis falhas para minimizar os riscos e custos associados às ocorrências dessas mesmas (Poór *et al.*, 2019; Nissoul *et al.*, 2020).

A forma mais comum de fazer frente ao início de uma sociedade industrializada e desenvolvimento económico de um país dá-se mediante mudanças no processo produtivo, mudanças tecnológicas, bem como no desenvolvimento de máquinas e equipamentos. É, portanto, fundamental no processo de industrialização o desenvolvimento da indústria (Trojan & Marçal, 2017; Borjalilu & Ghambari, 2018).

Segundo Spear (2008) um dos marcos mais icónicos do início da revolução industrial foi a máquina a vapor inventada por James Watt em 1765. Desde o início da primeira revolução industrial vários setores tiveram de introduzir novas máquinas ou melhorar as já existentes. Exemplo desta mudança é o setor agrícola que teve a necessidade de introduzir máquinas de cultivo. O acompanhar das mudanças e evoluções que se faziam sentir levou a industrialização dos países.

A Manutenção sendo uma parte importante em cada uma das revoluções industriais também teve de se ir contextualizado conforme as fases de cada revolução industrial, o que levou a Manutenção sofrer várias alterações quer de importância dentro da empresa como na forma de realizar as intervenções nos equipamentos (Trojan & Marçal, 2017; Borjalilu & Ghambari, 2018; Poór *et al.*, 2019; Nissoul *et al.*, 2020).

Fruto da melhoria dos processos produtivos, e a necessidade de procurar atingir os objetivos produtivos, após procura incessante por parte dos elementos responsáveis por estas atividades, foi possível verificar que alguns dos componentes que constituem as máquinas e equipamentos podem ser substituídos, dando origem ao conceito de peças de substituição. Pelo que o trabalho do operador de manutenção se transformou numa atividade muito mais ampla, no qual o diagnóstico e o planeamento, entre outras

tarefas se tornaram preponderantes (Otani & Machado, 2008; Menga, 2022; Dohale *et al.*, 2022).

Antes da primeira guerra mundial que ocorreu em 1914, não existiam serviços dedicados à atividade de Manutenção. O próprio pessoal da produção era responsável pela Manutenção da máquina, já que não havia ninguém especializado na área da Manutenção. Além disso, a inexistência da complexidade das máquinas tornava a reparação relativamente simples (Pinjala *et al.*, 2006; Meneghini, 2017; Dobrzański, 2019).

Após a primeira guerra mundial com o aparecimento de produtos em grande escala, surge a necessidade da construção das primeiras grandes indústrias. Assiste-se a uma mudança de atitude: os equipamentos eram reparados após avaria. Surgindo assim a manutenção corretiva dentro das empresas (Pinjala *et al.*, 2006; Meneghini, 2017; Dobrzański, 2019).

O desenvolvimento dos métodos preventivos aumentou com a expansão da aviação comercial a partir do fim da Segunda Guerra Mundial. Nas empresas são criadas estruturas próprias da Manutenção, sem dependência direta da produção. Começaram a preocupar-se não só em corrigir as falhas, mas também em evitar o seu aparecimento (Pinjala *et al.*, 2006).

Começa a ganhar forma uma nova disciplina, a Engenharia da Manutenção, a qual assume um papel importante, tendo em vista melhorar o funcionamento do chão de fábrica. Por meio dos avanços tecnológicos, passam-se a identificar e a medir parâmetros de funcionamento, a avaliar a sua variação e a calcular o momento da falha. Este levantamento e análise dos parâmetros, contribui para um melhor e mais precoce diagnóstico de avarias (Pinjala *et al.*, 2006; Dobrzański, 2019).

A evolução das tecnologias e a globalização, assim como a introdução do computador, possibilitou não só melhorar o desempenho das atividades de manutenção, como também permitiu melhorar a recolha e a organização de grandes quantidades de informação, que outrora eram tarefas difíceis e morosas (Pinjala *et al.*, 2006).

As empresas que não acompanham o desenvolvimento tecnológico não conseguem sobreviver (Meneghini, 2017; Dobrzański, 2019).

2.2. Definição e Tipos de Manutenção

O conceito e a importância da manutenção têm variado consoante a época da sua análise, sendo que nos dias de hoje é vital para qualquer área e tipo de indústria. Segundo Didelet & Sena (2016), a manutenção é conjunto de ações que têm por fim executar as operações necessárias para que os equipamentos sejam mantidos ou restabelecidos num estado especificado ou com possibilidade de assegurar um serviço determinado, por um custo global mínimo (Didelet & Sena, 2016).

A *Association Française de Normalisation* (AFNOR) FDX60-000 define Manutenção como “sendo um conjunto de ações que permitem manter ou restabelecer um bem num estado especificado ou com possibilidade de assegurar um serviço determinado, a um custo global otimizado”.

A norma EN NP 13306:2021 define a Manutenção como “a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”, entendendo-se por “bem qualquer elemento, componente, aparelho, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente” (EN NP 13306, 2021).

No decorrer das várias revoluções industriais, até aos dias de hoje, ainda existe alguma divergência no que diz respeito à adoção de critérios para a definição e enquadramento dos tipos de Manutenção pois nem todos os autores estão de acordo com esta divisão, criando assim alguma discrepância. Qualquer tentativa para classificar os modelos de Manutenção poderá ter algumas críticas, pois não existe um consenso em relação às designações de Manutenção, nem às características e atribuições de cada tipo de Manutenção (Rani *et al.*, 2015; Gackowiec, 2019). A Figura 2.1 mostra os vários tipos de manutenção existentes segundo Didelet & Sena (2016).

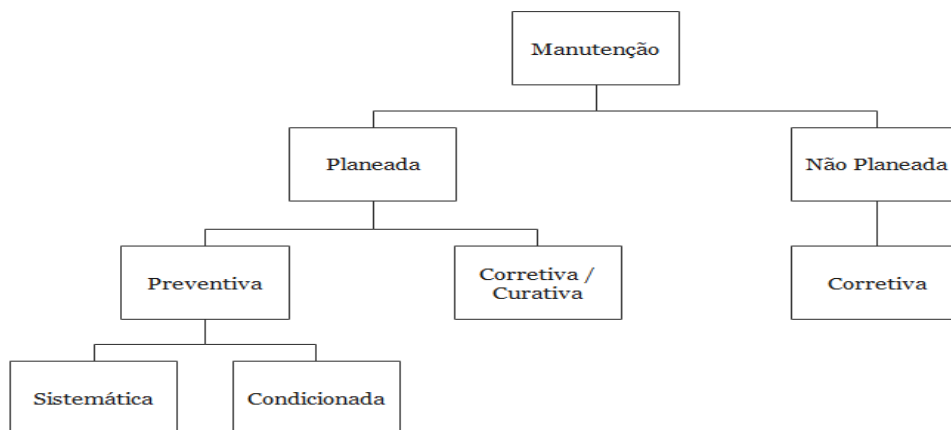


Figura 2.1 – Classificação dos diferentes tipos de manutenção (Adaptado de Didelet & Sena, 2016).

Embora a classificação das práticas de Manutenção passa por dividi-las em manutenção planeada e não planeada, Pinto (2013) e Didelet & Sena (2016) apresentam uma estrutura para a classificação quanto aos tipos de manutenção (Figura 2.2).

Manutenção Planeada – na Manutenção Planeada a intervenção obedece a um programa previamente estabelecido que tem diferentes objetivos: equilibrar a carga de trabalho da Manutenção, evitar a ocorrência de avarias ou mau funcionamento, compatibilizar as intervenções com o programa de fabrico ou de serviço dos equipamentos, assim como preparar antecipadamente os recursos para tornar as intervenções eficazes e económicas. O conceito de Manutenção Planeada terá, normalmente, um carácter preventivo, mas também poderá incluir determinados trabalhos de Manutenção Corretiva no momento da intervenção (Pinto, 2013; Didelet & Sena, 2016).

Manutenção não Planeada – neste tipo de Manutenção a intervenção é feita após o aparecimento de uma anomalia ou quebra. Na Manutenção não Planeada inclui-se todas as intervenções não programadas antecipadamente e sendo estas não realizadas periodicamente. O conceito de Manutenção não Planeada será, na maioria dos casos, de carácter corretivo, mas poderá incluir ações de Manutenção preventiva se tal se justificar no momento da intervenção (Pinto, 2013; Didelet & Sena, 2016).

Manutenção Preventiva – A manutenção preventiva foi introduzida para superar as limitações da manutenção corretiva. É a manutenção utilizada com o intuito de evitar ou reduzir a probabilidade de ocorrência de falha que possam surgir no equipamento. Esta obedece a uma prevenção previamente executada baseada em estudos estatísticos,

estado do equipamento, local de instalação, condições elétricas, de forma a garantir o funcionamento (Pinto, 2013; Didelet & Sena, 2016).

Manutenção Preventiva Sistemática – A manutenção preventiva sistemática considera que os padrões de falhas são constantes, pelo que as intervenções são planeadas com intervalos de tempo preestabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, que pretendem repor as condições iniciais de fiabilidade dos sistemas e seus componentes antes da ocorrência da falha, mas sem controlo prévio do estado do equipamento. Os intervalos das intervenções sistemáticas baseiam-se, inicialmente, nas dos fabricantes, embora se requeira sempre o contributo crítico do técnico para as afinar face ao cenário real de operação do equipamento. Após algumas intervenções este intervalo pode ser estimado com base no estudo de fiabilidade realizado a partir do histórico do equipamento. A maior dificuldade desta manutenção reside na identificação do período que maximiza a utilização de um determinado equipamento. Esta dificuldade é proporcional à complexidade do equipamento em causa, pois quanto mais complexo este for, mais difícil se torna na identificação do padrão da falha (Pinto, 2013; Didelet & Sena, 2016).

Manutenção Preventiva Condicionada – Esta manutenção é baseada no conhecimento do estado real dos equipamentos, através da inspeção do estado de funcionamento dos equipamentos e/ou dos parâmetros significativos do seu funcionamento. As ações de manutenção são decorrentes da avaliação do estado de condição dos equipamentos. A inspeção do estado ou dos parâmetros de funcionamento pode ser executado segundo um calendário pré-definido, em modo contínuo ou devido a uma ação específica. Da análise dos parâmetros de funcionamento dos equipamentos (vibrações, ruído, termografia, tribologia, etc.), podem-se prever futuras ocorrência de falhas, através do estudo das curvas de tendência ou por comparação com os valores padrão definidos pelos fabricantes. Na prática, este tipo de manutenção sucede quando se acompanha a degradação de um equipamento e se intervém numa data programada de acordo com a previsão da chegada a um determinado patamar de degradação. Com este tipo de manutenção é possível obter ganhos por redução de perdas de produção e de custos de manutenção. Assim, este tipo de manutenção tem grande aplicação em instalações ou equipamentos cuja falha pode provocar catástrofes ou riscos ao meio ambiente; sistemas complexos e/ou de operação contínua (Pinto, 2013; Didelet & Sena, 2016).

Manutenção Corretiva Curativa – a manutenção curativa refere-se quando se repõem o sistema em funcionamento após se ter verificado desgaste, rotura ou

desafinação ao ponto de alterar significativamente o funcionamento do sistema, estas situações são designadas, geralmente por avaria. Trata-se de trabalhos imprevistos e esporádicos, cuja execução invoca fundamentalmente a capacidade técnica do executante, quer na execução como na fase de deteção. Assim, engloba a reparação de acidentes ocorridos e avarias quer sejam mecânicas, elétricas ou outras (Pinto, 2013; Didelet & Sena, 2016).

Manutenção Corretiva – As ações de manutenção corretiva referem-se a ações não planeadas, estando dependente da ocorrência imprevisível de falhas ou avarias. Deste modo, permite restabelecer o funcionamento seguro e eficiente do equipamento. O equipamento está em funcionamento até que a falha ocorra, momento em que é reparado ou substituído. De forma a minimizar o impacto na produção criada por falhas inesperadas dos equipamentos, as equipas de manutenção devem estar aptas a reagir imediatamente às falhas (Pinto, 2013; Didelet & Sena, 2016).

A Figura 2.2 apresenta um tipo de manutenção ao qual a estrutura de classificação das práticas de manutenção anterior (Figura 2.1.) não apresenta, sendo esta a manutenção de melhoria, estando alinhada com a atual NP EN 13306:2021.

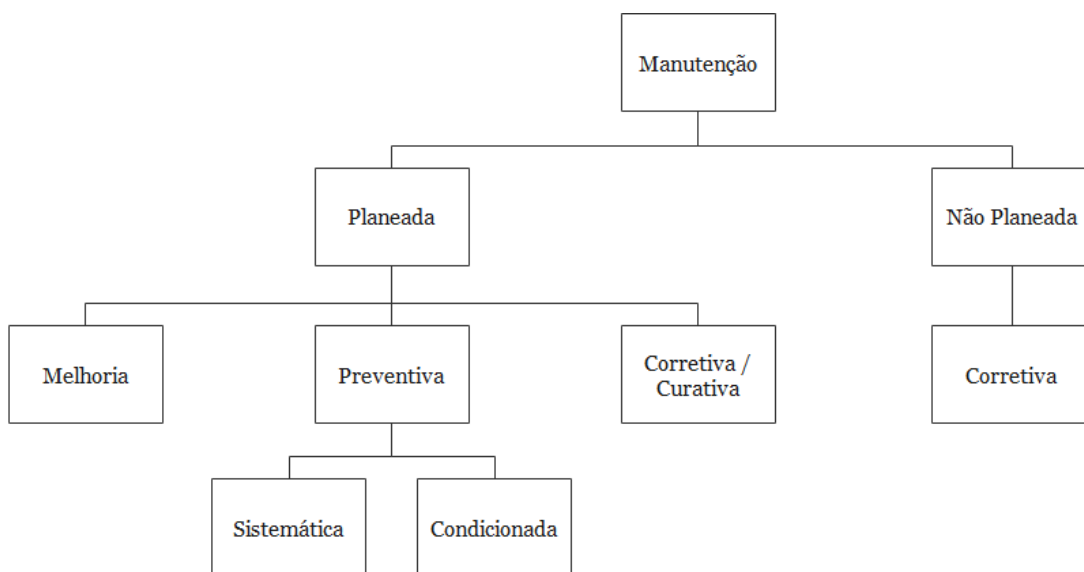


Figura 2.2 – Classificação dos diferentes tipos de manutenção incluindo a Manutenção de Melhoria (Adaptado de Didelet & Sena, 2016).

Manutenção de melhoria – A manutenção de melhoria é destinada a melhorar o desempenho do bem no contexto em que está inserido, consiste na reparação programada das avarias detetadas durante as inspeções preventivas ou preditivas. Na manutenção de melhoria incluem-se as ações de modificação ou alteração que se

executam num determinado equipamento com o objetivo de melhorar o seu desempenho, segurança, assim como a sua atualização por incorporação de novas características sem modificar a sua função requerida. Ações como melhoria dos sistemas de lubrificação, melhoria de proteções, eliminação de fontes de contaminação, redução do risco de acidentes e melhorias na forma, tipo e acesso aos componentes, caracterizam esta política de manutenção (Khodabakhshian, 2013; Didelet & Sena, 2016).

2.3. Objetivos e Funções Manutenção

Para que as empresas consigam sobreviver no atual cenário em que a competitividade entre empresas é a nível global, as partes constituintes da mesma devem estar necessariamente em sintonia com os objetivos gerais e das políticas de manutenção não podendo nenhuma delas constituir exceção. O desempenho e a competitividade das empresas dependem do comportamento do seu sistema produtivo. Assim a manutenção é um fator determinante e imprescindível para qualquer empresa (Muchiri *et al.*, 2011; Didelet & Sena, 2016).

A utilização ou a falta de utilização de um equipamento pode trazer para além do desgaste e deterioração normais do decorrer do tempo, o aparecimento de falhas quando este é utilizado de forma extrema ou pela má utilização do mesmo. Como resultado, o equipamento pode ter de ficar durante um tempo inoperacional, ou pode estar a trabalhar, mas provocando problemas de qualidade e desempenho produtivo entre outros problemas (Muchiri *et al.*, 2011; Didelet & Sena, 2016).

Desta forma, é necessário fazer com que os equipamentos não funcionem até ocorrer uma falha ou até à sua quebra total. Surge assim a necessidade de fazer com que a manutenção seja feita de forma estratégica para assim colmatar todos os problemas que possam ocorrer no sistema produtivo (Muchiri *et al.*, 2011; Didelet & Sena, 2016).

Uma ótima manutenção pressupõe que os seus objetivos sejam alinhados com os objetivos gerais da empresa. Com a intervenção da manutenção pretende-se que melhore a manutibilidade ou que as avarias sejam reduzidas de modo que haja melhoramento na fiabilidade dos equipamentos (Muchiri *et al.*, 2011; Didelet & Sena, 2016).

De modo que os equipamentos e instalações (ativos) possam cumprir com a sua função requerida, a manutenção deve ser realizada ao longo do ciclo de vida destes, para assim

ter um sistema de produção com segurança, fiabilidade, preservação do meio ambiente e custos adequados, fazendo com que estes tenham uma alta disponibilidade e fiabilidade. Também se deve garantir que o uso dos recursos financeiros da empresa para a manutenção, produção e matéria-prima sejam utilizados de forma eficiente e eficaz pelo apoio dado pela manutenção. Uma boa manutenção consiste em assegurar todas estas operações a um custo global mínimo e melhorado. Independentemente do objetivo entendido primordial, as linhas de orientação ou linhas de força da manutenção devem passar necessariamente pelos seguintes objetivos: Segurança, Qualidade, Custo e Disponibilidade (Muchiri *et al.*, 2011; Didelet & Sena, 2016).

Seguidamente, são apresentados os quatro principais objetivos da manutenção (Muchiri *et al.*, 2011; Didelet & Sena, 2016):

- **Segurança** – pretende-se garantir a segurança de todos os intervenientes no processo (pessoas, equipamentos, comunidade e utentes). Sendo que este objetivo deve de ser inegociável e primordial em todos os sentidos.
- **Qualidade** – sendo cada vez mais um requisito por parte dos clientes e um alicerce na competitividade, a qualidade também é um dos objetivos fundamentais da manutenção. Esta, deve garantir o bom funcionamento dos equipamentos, de modo a aumentar a disponibilidade, a qualidade dos produtos fabricados, assim como melhores condições de higiene e um melhor tratamento do meio ambiente.
- **Custo** – os custos globais de produção poderão ser minimizados graças à manutenção, tendo em conta todos os custos próprios de produção, e/ou provocados pela manutenção ou não manutenção.
- **Disponibilidade** – com a manutenção pretende-se que os equipamentos estejam disponíveis para operação o máximo de tempo possível, reduzindo ao mínimo possível as imobilizações planeadas e não planeadas contribuindo, assim, para assegurar a regularidade do sistema produtivo como o cumprimento dos prazos estipulados de cada encomenda.

2.4. Gestão da Manutenção

A gestão da manutenção tem a função de coordenar as políticas de manutenção, assim como de estabelecer etapas e objetivos, a fim de se obter uma melhor utilização das máquinas e equipamentos disponíveis de forma a dar o melhor desempenho e resposta ao que o mercado procura. Sendo importante que esta seja compreendida por todas as

áreas que interagem com a mesma (Didelet & Sena, 2016; Trojan & Marçal, 2017; Borjalilu & Ghambari, 2018; Poór *et al.*, 2019; Nissoul *et al.*, 2020; Menga, 2022).

A norma EN NP 13306:2021 define que a gestão de manutenção são todas as atividades de gestão que determinam os requisitos de manutenção, objetivos, estratégias e responsabilidades e a implementação destas por diversos meios tais como planeamento, o controlo e a melhoria das atividades de manutenção e aspetos económicos.

Para o desempenho da gestão da manutenção é necessária a interdisciplinaridade. Esta, envolve duas vertentes: a vertente *Hard* e a *Soft*. A vertente *Soft* diz respeito às técnicas estatísticas a utilizar na gestão da manutenção e que permitem avaliar de forma objetiva a fiabilidade dos sistemas reparáveis. Enquanto a vertente *Hard* diz respeito à execução técnica associada à reparação dos sistemas avariados (Zhu *et al.*, 2002; Muchiri *et al.*, 2011; Borjalilu & Ghambari, 2018; Nissoul *et al.*, 2020; Menga, 2022; Dohale *et al.*, 2022).

A gestão da manutenção tem como objetivos (Zhu *et al.*, 2002; Didelet & Sena, 2016):

- Reduzir o custo da unidade de produção;
- Minimizar o tempo de inatividade;
- Melhorar a disponibilidade total do sistema;
- Aumentar a vida útil do equipamento;
- Aumentar a segurança pessoal;
- Reduzir horas extras e terceirização;
- Fornecer melhor estabilidade do processo;
- Reduzir o *stock* de peças de manutenção.

2.5. Níveis da Manutenção

As ações de manutenção são caracterizadas segundo o seu grau de complexidade, seja técnica, de qualificação dos executantes, ou dos meios envolvidos. Os níveis são definidos a partir da complexidade da operação a executar, correspondendo assim ao executante mais adequado para efetuá-lo (Rachidi *et al.*, 2012; Pinto, 2016).

Segundo a norma da AFNOR FDX60-000 existem 5 níveis de intervenção da manutenção (AFNOR FDX60-000):

Nível I – Representa as afinações simples e a substituição de elementos acessíveis, sem desmontagem ou abertura do equipamento. Este nível baseia-se fundamentalmente em utilizar procedimentos como a inspeção visual e regulações simples ou bem como a troca de componentes como lâmpadas ou fusíveis.

Nível II – Engloba operações simples de manutenção preventiva (rondas) ou substituição de elementos *standard* destinados para esse efeito. Neste nível quem executa a ação de manutenção é um técnico qualificado com procedimentos detalhados e instalações de apoio definidos nas instruções de manutenção. Exemplo: lubrificação.

Nível III – Representa todas as operações relativas à manutenção preventiva, assim como reparações mecânicas simples, substituição de elementos funcionais, bem como a identificação e diagnóstico de avarias. O trabalho é realizado por um técnico qualificado, utilizando procedimentos detalhados, no local ou nas instalações de apoio previstas nas instruções da manutenção. Exemplo: Regulação/calibração do equipamento.

Nível IV – Atividades de renovação e reconstrução através de operações importantes de manutenção corretiva planeada. Neste nível também engloba a regulação dos aparelhos de medida que são utilizados nas ações de manutenção, assim como a verificação dos padrões por organismos especializados. É neste nível que existe um técnico ou uma equipa especializada, com ajuda das instruções gerais ou específicas de manutenção, com oficina especializada e equipada com equipamentos de ensaio e controlo específico.

Nível V – Este nível engloba todas as atividades de renovação, reconstrução ou reparações importantes utilizando técnicas específicas ou tecnologias, processos e/ou equipamentos de apoio industrial realizados numa oficina central ou numa unidade exterior.

2.6. Custos de Manutenção

A manutenção ao longo do ciclo de vida de um equipamento é fundamental, para que este possa desempenhar a sua função requerida de forma satisfatória, de modo a não comprometer todo o planeamento produtivo, assim como a qualidade dos produtos e os custos associados a estes. O custo de manutenção pode ser definido como sendo o custo inerente à perda de oportunidades relacionadas à falta de disponibilidade, também por perdas na taxa de produção ou na qualidade dos produtos fabricados, que pode ser

influenciada pelo mau funcionamento por parte dos equipamentos (Henderson *et al.*, 2014; Komninakis *et al.*, 2018).

Os custos associados à manutenção podem ser divididos em 3 classes de custos distintos: custos diretos, indiretos e especiais. Os custos diretos (parte visível do “*Iceberg*”) estão associados à manutenção do equipamento em estado operacional. São por exemplo, custos de peças de reserva, custos de mão-de-obra direta, custos de serviço, entre outros. Por outro lado, os custos indiretos (parte inferior do “*Iceberg*”), são consequência de uma avaria, paragens, intervenções de manutenção, e alguns custos podem ser influenciados pela manutenção relacionados com a baixa produtividade, não qualidade, acidentes, entre outros (Figura 2.3) (Barraza-Barraza *et al.*, 2014; Wienker *et al.*, 2016).

Os custos especiais, podem ser a percentagem da amortização e a percentagem de despesas diversas, entre outros. Os custos de não manutenção são mais difíceis de materializar. Refletem-se na indisponibilidade e na degradação do funcionamento dos equipamentos, dando origem a diminuição da disponibilidade e da qualidade do produto, podendo causar por sua vez, um decréscimo nas vendas. Por outro lado, os custos causados pela não-manutenção poderão ser substancialmente superiores aos custos da manutenção (Henderson *et al.*, 2014; Barraza-Barraza *et al.*, 2014; Wienker *et al.*, 2016).

Na figura 2.3 está representado o “*Iceberg*” de custos reais relativos à manutenção. A zona submersa, substancialmente maior (4 vezes maior) que a ponta visível do “*Iceberg*”, representa os custos difíceis de quantificar, sendo estes os custos indiretos. Os custos contabilísticos ou diretos, encontram-se na ponta visível do “*Iceberg*”, representam cerca de 20% dos custos totais da manutenção (Pais *et al.*, 2020; Azriadi, 2021).



Figura 2.3 – “Iceberg” dos custos (Cabral, 2006).

2.7. Modelos de Gestão da Manutenção

Perante a competitividade das empresas, uma gestão eficiente e eficaz da manutenção contribui para que estas possam alcançar os seus objetivos e a controlar os custos produtivos e de manutenção. Os modelos *Total Productive Maintenance* (TPM) ou Manutenção Produtiva Total e *Reliability Centred Maintenance* (RCM) ou Manutenção Centrada na Fiabilidade tem sido aplicados com êxito na indústria, a nível mundial, no decorrer das últimas décadas (Pinjala *et al.*, 2006; Mahabir & Punb, 2022).

2.7.1. Total Productive Maintenance

A manutenção preventiva teve origem nos Estados Unidos e no início dos anos 70, foi introduzida no Japão. Nessa altura a indústria japonesa trabalhava só com o conceito de manutenção corretiva. As constantes alterações da época, do mercado e os elevados custos produzidos por realizar uma manutenção só após avaria levaram a que houvesse um elevado interesse em procurar uma forma de melhorar o desempenho entre a relação homem-máquina e nos restantes recursos (Ireland & Dale, 2001; Silva Santos & Silva, 2021).

Foi assim que no Japão em 1970, mais especificamente na empresa Nippon Denso do grupo Toyota que surgiu a *Total Productive Maintenance* (TPM) ou Manutenção Produtiva Total, que tinha na sua génese a manutenção preventiva e a manutenção autónoma, esta consiste numa manutenção básica na qual os colaboradores de uma empresa tratam corretamente das máquinas, do seu espaço de trabalho, da qualidade

dos artigos fabricados, da segurança e que partilham o conhecimento obtido no trabalho diário (Gupta & Garg, 2012; Jain *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2019).

A TPM pode-se definir como um sistema de manutenção que envolve a participação de todos as áreas e hierarquias da empresa, principalmente a produção e a manutenção, visando a melhoria na eficiência e responsabilizar todos os envolvidos sobre a manutenção dos bens produtivos. A TPM veio fazer com que a manutenção fosse uma parte vital e de grande importância nas empresas mudando o paradigma original de que a manutenção não era considerada como uma área estratégica, mas sim geradora de custos (Gupta & Garg, 2012; Jain *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2019).

O objetivo da TPM é a melhoria da eficiência global da empresa, quer em relação aos aspetos humanos como em termos materiais (equipamentos, ferramentas, etc.). Para obter o objetivo da TPM deve-se alcançar e manter as condições iniciais dos equipamentos, deste modo, evitam avarias inesperadas, perdas de velocidade e qualidade e defeitos no processo.

Deste modo, a TPM defende que os operadores dos equipamentos participem de forma ativa na manutenção dos equipamentos, já que estas pessoas conhecem bem os equipamentos podendo assim ajudar a definir os planos de manutenção mais adequados aos equipamentos tendo em conta as várias condições de funcionamento. A TPM tem outro objetivo que é a satisfação do cliente, o fabrico dos produtos deve-se basear no que os clientes desejam, fazendo com que as características do produto sejam consoante o que estes pretendam. Outro objetivo é o aumento do lucro, isto implica ir reduzindo tudo o que possam ser desperdícios produzidos no sistema de produção (Madanhire & Mbohwa, 2015; Suryaprakash *et al.*, 2021; Singh & Gurtu, 2022).

De forma sucinta pode-se identificar três objetivos finais da TPM: zero defeitos, zero acidentes e zero avarias; Envolver as pessoas em todas os níveis da organização independentemente das suas diferentes competências na manutenção, desde operadores dos equipamentos, pessoal da manutenção até ao nível superior de gestão; Formar equipas diferentes para reduzir defeitos e estruturação de uma manutenção autónoma realizada pelos operadores ou pequenos grupos com uma participação total em cada departamento e em cada nível hierárquico (Agustiady & Cudney, 2018; Okpala *et al.*, 2018).

A TPM abre caminho para um excelente planeamento, organização, monitorização e práticas de controlo por meio dos seus oito pilares assentes na metodologia 5 S como

mostra a figura 2.4. Cada um dos oito pilares da TPM são de grande importância e caso não sejam alicerçados da melhor maneira toda a estrutura que sustenta o TPM é prejudicada (Melo & Loos, 2018; Singh & Singh, 2020; Xiang & Chin, 2021).

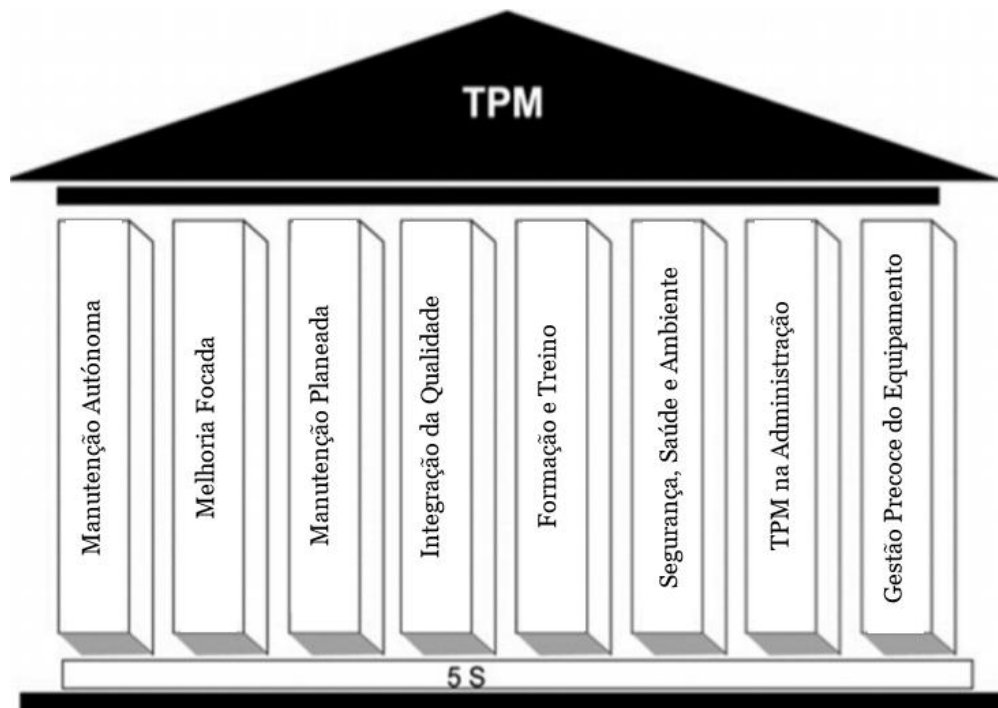


Figura 2.4 – 8 Pilares do TPM (Adaptado de Parikh & Mahamuni, 2015).

5S: metodologia que ajuda a alicerçar bem os oito pilares do TPM. Os 5S é uma metodologia simples e eficaz que ajuda na redução de desperdícios e na melhoria contínua do desempenho das pessoas e processos. Esta metodologia é baseada em cinco passos: *Seiri* – Organização, *Seiton* – arrumação, *Seiso* – limpeza, *Seiketsu* – padronização e *Shitsuke* – disciplina, em que cada passo funciona como pré-requisito para o passo seguinte (Kaushik *et al.*, 2015; Burawat, 2019).

Manutenção autônoma: Pilar que tem por base a metodologia de melhoria contínua 5 S. Neste pilar o operador de máquina torna-se o elemento-chave, pois é este quem irá ter a responsabilidade de realizar pequenas atividades de manutenção (limpeza, aperto de parafusos e lubrificação). O operador tendo esta postura sentir-se-á como mais um elemento importante o que ajudará no seu desenvolvimento e gosto pelo posto de trabalho, assim como também ajuda a criar mais tempo para a equipa de manutenção ficando esta com mais tempo para tarefas morosas e complexas (Parikh & Mahamuni, 2015; Kaushik *et al.*, 2015; Burawat, 2019).

Melhoria Focada: este pilar tem como objetivo identificar pequenas coisas que possam ser melhoradas. Pois várias pequenas melhorias têm mais efeito do que

grandes melhorias em menor quantidade. O pilar Melhoria Focada tem por base a metodologia *Kaizen*. Esta metodologia procura eliminar os desperdícios nas empresas de forma gradual e contínua, de modo a possibilitar o aumento da produtividade do chão de fábrica (Parikh & Mahamuni, 2015; Kaushik *et al.*, 2015; Burawat, 2019).

Manutenção Planeada: O pilar Manutenção Planeada (MP) tem como objetivo manter os equipamentos sem falhas com base no comportamento dos equipamentos que se foi observando ao longo do tempo ou pelas recomendações do fabricante. Assim, passa por estruturar devidamente a manutenção da empresa de modo a agendar e conduzir as intervenções planeadas, a fim de eliminar os tempos de paragens imprevistos sem deixar de cumprir os requisitos de produção (Rajput & Jayaswal, 2012; Kigsirisin *et al.*, 2016).

Integração da Qualidade: Pilar que promove a utilização de métodos de deteção de erros na produção como também a utilização desses métodos para analisar a origem dos erros e ajudar a resolver esses mesmos. Com a deteção precoce ajuda a reduzir os custos associados a uma produção com erros (Rajput & Jayaswal, 2012; Kigsirisin *et al.*, 2016).

Formação e Treino: este pilar tem como objetivo desenvolver competências nos colaboradores da empresa de forma a que estes consigam superar pequenos problemas que ocorrem diariamente no seu posto de trabalho. Colaboradores informados e formados dão outra dinâmica, pois estes ficam com mais autonomia, eficácia e polivalência (Parikh & Mahamuni, 2015; Kaushik *et al.*, 2015; Burawat, 2019; Ribeiro *et al.*, 2019; Schindlerová *et al.*, 2020).

Segurança, Saúde e Ambiente: este pilar deve ser visto de forma a conseguir atingir todas as metas da empresa bem como as necessidades de cada cliente, mas de forma saudável quer para os colaboradores como para o meio ambiente. Ou seja, o foco é criar um local de trabalho seguro sem comprometer toda as zonas pela atividade industrial, nem utilizar zonas que possam comprometer a saúde e segurança dos colaboradores (Parikh & Mahamuni, 2015; Ribeiro *et al.*, 2019; Ali, 2019; Zlatić, 2019; Schindlerová *et al.*, 2020).

TPM na Administração: este pilar promove a melhoria dos processos administrativos, bem como eliminar as suas perdas (exemplo: perda pela avaria do equipamento do escritório, tempo gasto na recuperação de informação, etc.). Estes processos possuem um impacto significativo no desempenho das operações de fabrico.

O sistema de produção tem de ter funções de apoio ao fabrico não só inclui o fabrico. O fabrico não é uma atividade independente, mas agora está totalmente integrada e dependendo das suas atividades de apoio (Ribeiro et al., 2019; Ali, 2019; Zlatić, 2019; Schindlerová et al., 2020).

Gestão Precoce do Equipamento: este pilar tem como objetivo ajudar todos os intervenientes que dão origem a um novo equipamento, ou seja, este pilar estimula o uso de todos os conhecimentos desde o desenvolvimento como da manutenção de produtos/equipamentos já concebidos na conceção de um novo equipamento. Caso seja aplicado, toda a informação e aprendizagem no desenvolvimento do produto fará com que o tempo de começo seja muito mais reduzido, o que influenciará nas seguintes fases como da produção e até mesmo nas recomendações de manutenção do novo produto/equipamento (Ribeiro *et al.*, 2019; Ali, 2019; Zlatić, 2019; Schindlerová *et al.*, 2020).

As seis grandes perdas do TPM

De modo a se conseguir alcançar os objetivos do TPM e maximizar a eficiência global dos equipamentos ou *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) e processos, tudo o que faça com que a eficiência seja comprometida, deve de ser eliminado. Deste modo, o TPM ajuda a eliminar as 6 grandes perdas de um sistema produtivo (Figura 2.5) (Sethia *et al.*, 2014; Da Silva *et al.*, 2019):

Perda devido a paragens não planeadas – este tipo de perda deve-se ao facto do aparecimento de uma avaria/falha de forma repentina, ou pode ser originado pelo desgaste do equipamento comprometendo o desempenho e, conseqüentemente, a produção.

Perdas por ajustes e *setup* – este tipo de perda é devido ao facto de haver a necessidade de parar a produção, para efetuar a mudança de produto de modo geral é necessário realizar ajustes nos equipamentos.

Perda por pequenas paragens – as perdas por pequenas paragens têm origem com a ocorrência momentânea de pequenos problemas que fazem com que o equipamento tenha de estar parado ou a funcionar em vazio.

Perda por redução de velocidade – é a perda de velocidade do processamento, influenciando no tempo de ciclo que aumenta, conseqüentemente diminuindo a produção.

Perda por defeitos de produção – perdas pela deteção de produtos produzidos com defeitos (parâmetros fora das especificações de qualidade), e, portanto, poderá ser necessário efetuar algum retrabalho de modo a remover os defeitos e fazer com que o produto fique dentro dos parâmetros de qualidade exigidos.

Perda por desempenho reduzido – tempo que alguns equipamentos necessitam para que possam atingir um desempenho estável. Neste período pode-se ter de perder parte da produção.

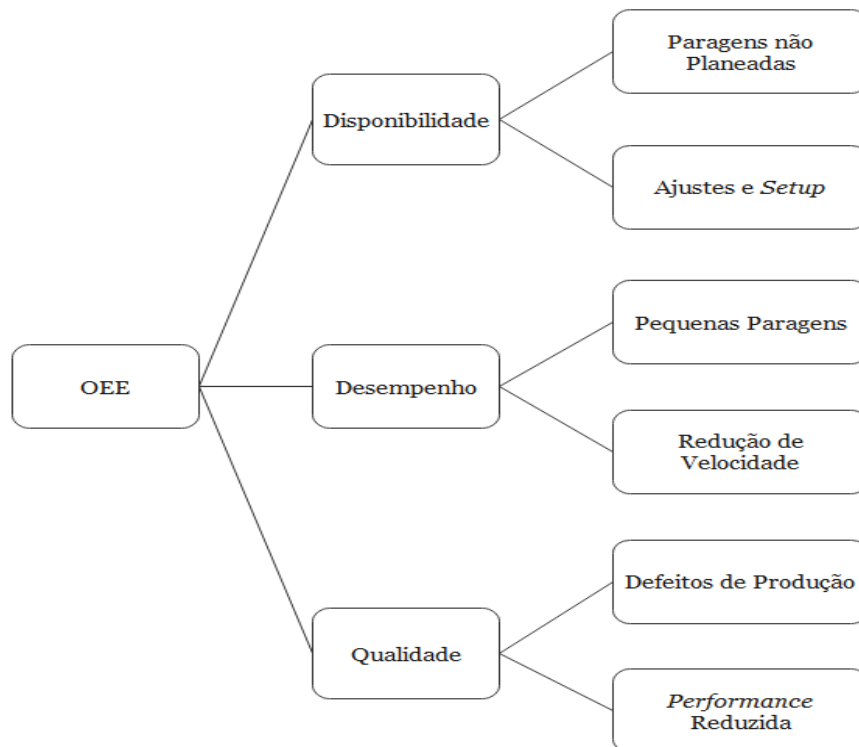


Figura 2.5 – Seis grandes perdas associadas ao OEE (Adaptado de Sethia *et al.*, 2014).

Implementação da TPM

A implementação da TPM deve ser feita com muito rigor, planeamento e preparação pois é a chave para alcançar uma boa implementação. A implementação de modo geral é feita em doze etapas que estão divididas em quatro fases (Anexo B.1). As doze etapas dão suporte às atividades básicas de desenvolvimento, que constituem os requisitos mínimos para o desenvolvimento da TPM (Poduval *et al.*, 2013; Gupta & Vardhan, 2016).

A primeira fase, designada como preparatória, consiste na preparação do ambiente da empresa, para a receção e introdução da TPM. A segunda fase, introdução: alargar a divulgação da implementação fora da organização, mais propriamente, aos seus

fornecedores e empresas filiais. A terceira fase, implementação: a fase de implementação é a fase de aplicação da metodologia. Na última fase, é conhecida como fase de consolidação: nesta fase deve-se efetuar um balanço de tudo o que foi realizado no âmbito TPM. É importante elaborar uma comparação dos resultados obtidos e os impostos no início do projeto. Daí para a frente, devem-se traçar novas metas e objetivos, agora ainda mais exigentes. Todo o processo deve-se fazer numa base de melhoria contínua, de modo a responder às necessidades da organização (Anexo B.1) (Poduval *et al.*, 2013; Gupta & Vardhan, 2016).

Caso a implementação não tenha sido feita de forma rigorosa, sem preparação e planeamento, a implementação tornar-se-á mais complicada sendo necessário de realizar as devidas correções, modificações durante a implementação até atingir o objetivo de cada fase/etapa da implementação do TPM (Poduval *et al.*, 2013; Gupta & Vardhan, 2016).

2.7.2. Reliability Centred Maintenance

A *Reliability Centered Maintenance* (RCM) ou Manutenção Centrada na Fiabilidade é uma metodologia de manutenção usada para determinar quais os procedimentos a desenvolver de modo assegurar que quaisquer ativos físicos consigam funcionar na sua plenitude, ou seja, que mantenham as suas funções originais ao longo do seu ciclo de vida (Mendes & Ribeiro, 2011; Khodabakhshian, 2013).

A RCM é uma metodologia que reúne várias técnicas de engenharia, que ajudam a determinar o que se deve fazer para assegurar que qualquer equipamento desempenhe as suas funções específicas de forma contínua ao longo do seu ciclo de vida com menos custos relativos à sua manutenção (Mendes & Ribeiro, 2011; Khodabakhshian, 2013).

A utilização do RCM ajuda a reduzir os custos associados à manutenção pois prioriza as funções mais importantes do sistema, agregando somente as atividades de manutenção necessárias para que o equipamento desempenhe as suas funções específicas evitando ou removendo sempre ações de manutenção desnecessárias (Mendes & Ribeiro, 2011; Khodabakhshian, 2013).

O objetivo fundamental da RCM é reduzir a probabilidade de falha e os custos associados à manutenção, através da criação de uma manutenção estratégica que preserve as funções específicas de sistemas e equipamentos de forma efetiva. Como resultado desta metodologia obtém-se um aumento da disponibilidade do equipamento

o que leva a um aumento da produção (Mendes & Ribeiro, 2011; Khodabakhshian, 2013).

A RCM tem como finalidade responder a sete questões de necessidades da manutenção de qualquer equipamento ou serviço no âmbito operacional, nomeadamente (Mendes & Ribeiro, 2011; Khodabakhshian, 2013):

Funções: Que funções e padrões de desempenho do ativo são realizadas no contexto atual?

Falhas funcionais: De que forma o ativo falha no cumprimento das suas funções?

Modos de falha: O que provoca cada uma das falhas funcionais?

Efeitos das falhas: O que ocorre quando acontece uma falha?

Consequências das falhas: Que importância tem uma falha?

Tarefas pró-ativas e frequência de ocorrência: O que pode ser feito para prevenir cada falha?

Ações padrão: Que medidas podem ser tomadas se for impossível implementar uma metodologia pró-ativa adequada?

Conforme forem as respostas dadas às perguntas da RCM vai-se conseguir entender como replanear o programa de manutenção, de modo a estabelecer o nível de desempenho aceitáveis do ativo.

Como já referido anteriormente, uma das características da RCM é fazer com que se tenha um método bem delineado para que se escolha a forma mais eficiente de colmatar os problemas que possam surgir ao longo da vida útil de um equipamento. Desta forma, é importante entender-se algumas definições muito utilizadas quando se aplica esta metodologia (Dunn, 2015; Tale, 2019):

Função: definição do que se pretende que um item faça dentro de uma função específica pretendida.

Falha: é um acontecimento e define-se como a cessão da capacidade de um item desempenhar a sua função específica.

Avaria: é o estado associado à ocorrência de uma determinada falha, e define-se como estado de um item caracterizado pela sua incapacidade de conseguir desempenhar a sua função específica (antes de ser repostado).

Modos de Falha: é a forma como a falha se evidencia. Na origem de uma falha pode-se atribuir vários modos de falhas e a cada modo uma ou mais causas possíveis para o seu aparecimento.

Mecanismo de falha: conjunto de elementos quer sejam estes físicos ou químicos, que fazem com que um item tenha uma falha.

Causa da falha: é o conjunto de acontecimentos que podem estar ligados ao modo como se utiliza um item, à forma como se realizou a manutenção do item que o conduziu à falha.

Efeitos das falhas: é o que resulta do aparecimento de um modo de falha.

Consequência de falha (para esta metodologia): caso uma falha venha a perturbar o sistema principal, ou seja, caso a falha cause um efeito tal e haja consequências a níveis de segurança, meio ambiente.

Implementação da RCM

A metodologia RCM para ser aplicada deve seguir várias etapas. De um modo geral seleciona-se o ativo físico, seguidamente observa-se de maneira concreta as funções, as falhas e os modos de falhas do mesmo. Após a identificação das funções, falhas e modos de falha do ativo deve-se proceder ao planeamento da manutenção do que é estritamente necessário e mais indicado para o ativo ou realizar uma avaliação ao planeamento já existente, de modo a que haja replaneamento do plano tornando-o mais eficiente e mais económico. Por último, deve-se avaliar e reavaliar todo o processo de modo a se conseguir uma melhoria contínua tanto no processo de implementação como do planeamento da manutenção proposto (Igba *et al.*, 2013; Meneghini & Zaions, 2019).

Recorrendo à figura 2.6 pode-se observar de forma esquemática as etapas de implementação da metodologia RCM. Para que esta seja implementada de forma correta é preciso levar a cabo oito etapas. A primeira etapa consiste na preparação e realização do estudo sobre a RCM, na qual se deve esclarecer e definir os objetivos. A segunda etapa consiste na seleção e determinação do sistema, ou seja, definir as

fronteiras do sistema que será alvo da implementação da RCM, definindo também, o nível de análise, seja relativamente ao chão de fábrica ou equipamento. Na terceira etapa, deve-se realizar a análise das funções e falhas funcionais, reunindo toda a documentação existente do equipamento, como a descrição do sistema, diagrama de blocos funcionais, interfaces de entrada e saída, lista de itens físicos e históricos de falhas funcionais. Na quarta etapa é possível selecionar e identificar os itens físicos potencialmente críticos relacionadas com as falhas funcionais. Na quinta etapa, realiza-se a recolha e análise necessárias para programar toda a análise da manutenção centrada na fiabilidade. Na sexta etapa, desenvolve-se a análise de efeitos e modos de falha, com o objetivo de identificar o papel que os itens físicos desempenham nas falhas funcionais, ou seja, encontrar os modos de falha do sistema ou equipamento. E as últimas duas etapas, sétima e oitava etapa, compreendem a seleção de tarefas preventivas viáveis e efetivas para a prevenção das falhas funcionais, e mais importante ainda, a definição da frequência das tarefas para determinar o intervalo ótimo das atividades de manutenção a realizar (Igba *et al.*, 2013; Meneghini & Zaions, 2019).



Figura 2.6 – Etapas de implementação da RCM (Adaptado de Meneghini & Zaions, 2019).

2.8. Normalização da Manutenção

As normas são acordos documentados e voluntários, resultantes de um consenso entre várias partes interessadas. Este documento é aprovado por um organismo de normalização reconhecido que especificam as regras e guias assentes em resultados científicos. Em Portugal a uniformização de: terminologias, conceitos, adaptação das normas europeias tem sido feito pela Associação Portuguesa de Manutenção Industrial (APMI) (Cabrita & Cardoso, 2015).

Existem várias normas portuguesas relacionadas com a manutenção, nomeadamente:

NP EN 13306:2021, “Terminologia da Manutenção” – Norma Portuguesa composta por um documento básico que especifica vários termos e definições para as várias áreas da manutenção.

NP EN 13269:2023, “Manutenção – Instruções para a preparação de contratos de manutenção” – Documento que ajuda a fazer a ponte entre contratados e fornecedores de serviços de manutenção. Esta norma ajuda também no estabelecimento das relações entre empresas, guias que dão suporte aos serviços de manutenção contratados (planeamento, gestão e controlo).

NP EN 15341:2022, “Manutenção – Indicadores de desempenho da manutenção (KPI)” – Esta norma descreve um sistema de gestão de indicadores (KPI) que ajudam a medir e avaliar o desempenho da manutenção quer seja de forma económica, técnica ou organizacional, para se atingir melhores níveis de desempenho da manutenção.

NP EN 13460:2009, “Manutenção – Documentação para a manutenção” – Norma que especifica os documentos que devem de ser fornecidos juntamente com um bem antes de este estar em funcionamento. A norma também especifica a informação e documentação que deve de ser estabelecida quando um bem está em funcionamento de modo ajudar na sua gestão e manutenção.

NP 4483:2009, “Guia para a implementação do sistema de gestão de manutenção” – Este documento tem como finalidade definir os requisitos mínimos de um sistema eficaz de Gestão da Manutenção de forma a ajudar as empresas atingirem os seus objetivos, com base na satisfação do cliente e na melhoria contínua.

NP 4492:2023, “Requisitos para a prestação de serviços de manutenção” – Norma Portuguesa que tem como objetivo de delimitar os requisitos para que os prestadores de serviços de manutenção ofereçam soluções adaptadas à necessidade de cada cliente, dando uma garantia de desempenho do ativo.

Capítulo 3

Filosofia *Lean*

Este capítulo apresenta a Filosofia *Lean*, abordando a sua origem e conceitos. Também são apresentadas as ferramentas *Lean* e outras ferramentas de apoio. Seguidamente é abordada a Manutenção *Lean*, indicando os seus princípios e os seus desperdícios. Ainda neste capítulo são apresentados os principais indicadores a utilizar na aplicação do modelo.

3.1. Origem e Conceitos

A FL teve a sua origem nos finais da Segunda Guerra Mundial na empresa Toyota Production System (TPS), desenvolvida para a indústria automóvel tendo posteriormente sido difundida e adaptada a outras áreas de atividade (Iuga & Kifor, 2013; Dave, 2020).

Tudo começou quando Henry Ford, fundador da Ford Motor Company, superou os problemas inerentes à produção artesanal, com a introdução da produção em massa, levando a uma redução drástica dos custos e aumentando ao mesmo tempo a qualidade do produto (Toma & Naruo, 2017; Yamamoto *et al.*, 2019; Htun *et al.*, 2019).

Nessa altura, a indústria automóvel era sobretudo uma indústria de produção em massa. Este tipo de produção baseava-se numa linha de montagem contínua que permitia fabricar um elevado número de automóveis a baixo custo e com elevadas taxas de produtividade. No entanto, esta indústria não permitia uma diversidade dos produtos. Outra desvantagem deste tipo de produção é que os processos de fabrico não eram flexíveis, a empresa sentia grandes dificuldades em se adaptar às necessidades do mercado, pois para fazer qualquer modificação no produto era necessário fazer modificações profundas na linha de produção, o que se tornava bastante dispendioso (Toma & Naruo, 2017; Yamamoto *et al.*, 2019; Htun *et al.*, 2019).

Inicialmente, Ford possuía um fluxo contínuo na montagem final tentando mais tarde atingir um fluxo contínuo em todo o percurso, desde a matéria-prima até à expedição do carro acabado, aliando todas as máquinas necessárias para produzir as peças. O método de Henry Ford apenas funcionou quando a diversidade era nula e o volume de

produção era elevado o suficiente para manter as linhas em funcionamento (Hazarika *et al.*, 2019; Paladugu & Grau, 2020).

O sistema de produção da Toyota nasceu após uma experiência quando o Eiji Toyoda e o engenheiro de produção Taiichi Ohno tentaram a produção em massa no Japão tendo em conta as ideias adquiridas após visita à unidade fabril nos Estados Unidos da América (Kaneko *et al.*, 2021).

Foi após esta visita que Taiichi Ohno afirmou que haveria a possibilidade de melhorar o sistema de produção da Toyota, no entanto considerou tratar-se de uma tarefa difícil devido ao facto da produção em massa não resultar no Japão. Desta forma, aperceberam-se que era necessário fazer uma adaptação ao mercado japonês, ou seja, em contraste com a filosofia da Ford da época, era necessário baixar os volumes devido aos diferentes modelos que usavam a mesma linha de montagem (Leong *et al.*, 2019).

No Japão da pós-guerra havia uma escassez de recursos quer de pessoas, espaço, materiais em comparação com os países ocidentais e a indústria teve de se adaptar a fazer muito com poucos recursos. Para além disso, o país não contava com recursos para investimentos para alta tecnologia e aquisição de máquinas pouco versáteis dedicadas apenas à realização de um único produto (Goshime *et al.*, 2019; Kelendar, 2020).

Taiichi Ono e seus colaboradores concluíram que a melhor forma de contornar as dificuldades do setor automóvel no Japão era criar um fluxo contínuo de pequenos lotes para situações em que a produção era de apenas umas dezenas de réplicas de um produto em vez de milhares como acontecia com a Ford (Goshime *et al.*, 2019; Kelendar, 2020).

Para ser possível produzir em lotes de produção mais pequenos, é necessário reduzir os prazos de entrega, assim como o tempo de preparação (*Setup*), o balanceamento da produção, a mudança de rotina dos colaboradores, a eliminação de desperdício e o tempo de movimentação de pessoas. O TPS foi desenvolvido para tornar a produção mais competitiva ao nível dos mercados mundiais e competindo diretamente com Henry Ford (Iuga & Kifor, 2013; Goshime *et al.*, 2019; Kelendar, 2020; Dave, 2020).

Taiichi Ono trabalhou para revolucionar os seus métodos produtivos com alterações profundas e estruturais, assentes numa forma de trabalho motivada para a mudança e a melhoria contínua. Assim, Ohno desenvolveu as mudanças no sistema de produção da empresa Toyota com o desenvolvimento da troca rápida de ferramentas, com isso

diminui o tempo ocioso dos trabalhadores e garantiu uma maior flexibilidade na produção. Outra mudança foi a redução dos lotes de produção levando a diminuição dos custos financeiros e dos grandes *stocks* de peças inacabadas, passando a produzir poucas peças antes da montagem dos carros, o que melhorou a percepção dos defeitos, e gerou menos desperdícios com peças (Goshime *et al.*, 2019; Kelendar, 2020; Dave, 2020).

Este sistema sustentado por conceitos como qualidade e flexibilidade de processo levou ao aumento da capacidade de produzir e competir. O sistema de produção da Toyota é adaptado para uma produção *Pull* (produção puxada) conforme as necessidades dos clientes. Além disto, este sistema tinha como principal objetivo aumentar a eficiência da produção eliminando os desperdícios. Este sistema para além de estar desenhando para a produção de pequenos lotes, esforça-se para obter produções de qualidade ao menor custo possível e no menor *lead time*¹ (Iuga & Kifor, 2013; Ismail *et al.*, 2019; Kelendar, 2020; Dave, 2020).

O TPS combina as vantagens da produção personalizada com a produção em massa evitando o custo elevado da produção da primeira e a rigidez da segunda, para além disso origina menos da metade do inventário de produtos e permite detetar bastantes defeitos (Ko & Chung, 2014; Coetzee *et al.*, 2016).

A FL tem como objetivo fazer cada vez mais com cada vez menos, ou seja, utilizando menos equipamentos, menos esforço humano, menos espaço e tempo. Busca aproximar-se cada vez mais às necessidades dos clientes, para oferecer aos clientes exatamente o que eles desejam, no tempo certo. Por outro lado, a FL implica alterações profundas no modelo organizacional e produtivo das empresas, mas também implica uma mudança de mentalidade. Para que a FL seja bem-sucedida, a empresa deve atender aos principais requisitos estratégicos desta filosofia como o compromisso de gestão, autonomia dos funcionários, transparência de informação e ajuste cultural (Ko & Chung, 2014; Coetzee *et al.*, 2016).

Ohno partiu para uma representação gráfica dos princípios e ideias definidas no TPS. Esta representação surge sob a forma de uma casa, “A casa do TPS” (Figura 3.1), esta é representada como uma estrutura com uma base sólida e pilares robustos que sustentam um telhado forte (Ko & Chung, 2014; Coetzee *et al.*, 2016).

¹ O *Lead Time* diz respeito ao tempo necessário para satisfazer a procura do cliente, ou seja, descreve o tempo decorrido entre o pedido do cliente até à expedição do mesmo (Ismail *et al.*, 2019).

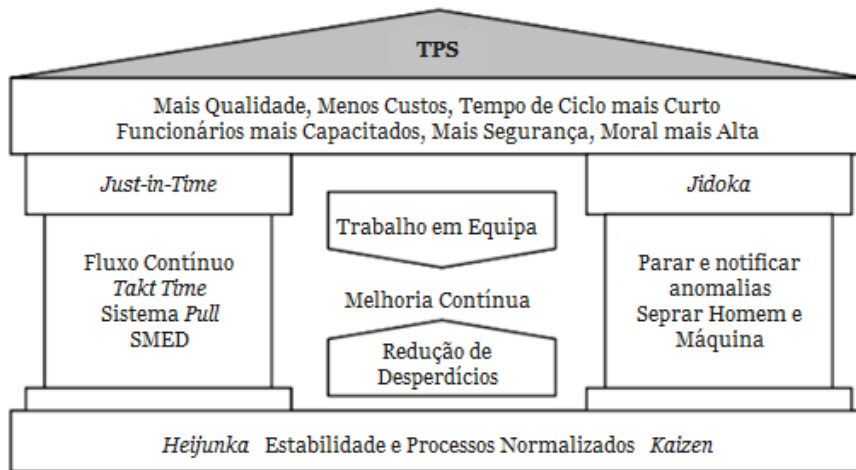


Figura 3.1 – Casa TPS (Adaptado de Herrmann *et al.*, 2008).

A casa TPS (Figura 3.1) é sustentada por dois pilares: *Just-in-Time* (JIT) e *Jidoka*. O telhado representa os objetivos do TPS, sendo a satisfação dos clientes como foco principal. Estes são cada vez mais exigentes, procurando produtos e serviços no menor *Lead Time* e com cada vez maior qualidade, isto consegue-se através da redução do fluxo de produção pela eliminação dos desperdícios (Kehr & Proctor, 2017; Hussein & Zayed, 2021).

O conceito JIT permite produzir somente o necessário na hora certa com produto certo. Para satisfazer os conceitos inerentes ao JIT é necessário implementar um sistema produtivo que permita um fluxo contínuo de produção. Desta forma, surge o sistema *Pull*, ao qual assenta na ideia de que seja o cliente a “puxar” a produção, isto significa que o produto só é produzido a partir do momento que o cliente solicita. Deste modo, controla-se o volume de produção, permitindo assim que se produza as quantidades necessárias no momento certo (Kehr & Proctor, 2017; Hussein & Zayed, 2021).

O objetivo final do JIT consiste em construir um sistema balanceado que permita atingir um rápido fluxo de materiais sendo que a ideia é tornar o processo o menos demorado possível. Para isso, é necessário atingir alguns objetivos intermédios sendo eles tornar o sistema flexível, eliminar desperdícios e evitar roturas (Kehr & Proctor, 2017; Hussein & Zayed, 2021).

O pilar, *Jidoka* é um termo japonês que significa automação com intervenção humana. Este termo consiste na automação das máquinas, de forma a permitir um maior rendimento e controlo dos processos. Para além disso, o *Jidoka* permite que um operador seja autónomo para parar a produção quando é detetada uma anomalia, permitindo um maior controlo da qualidade, uma vez que o problema pode ser

resolvido no instante em que é detetado. O *Jidoka* permite que um operador tenha a cargo várias máquinas ao mesmo tempo, e assim melhorar significativamente a sua produtividade. Este termo aplicado às máquinas é concebido para parar automaticamente sempre que ocorre um problema, como por exemplo, a produção de uma peça defeituosa (Da Silva, 2016; Rewers *et al.*, 2016; Tekin *et al.*, 2019).

O *Kaizen* corresponde à palavra japonesa que significa melhoria contínua, e divide-se pelos termos japoneses *kai* que significa mudar e *zen* que significa melhorar. Refere-se a uma filosofia que garante a melhoria contínua com vista à perfeição da atividade, assim como também aborda medidas a serem tomadas para reduzir e/ou eliminar ineficiências que sejam identificadas. Por outro lado, o *Heijunka* significa em japonês de forma literal, “nivelamento”. É uma ferramenta que permite planear e nivelar a produção em termos de volume e variedade, satisfação da procura do cliente (Kehr & Proctor, 2017; Hussein & Zayed, 2021).

3.2. Ferramentas da Filosofia *Lean*, Qualidade e Outras Ferramentas de Apoio

O êxito da implementação da FL deve-se em grande parte à sua alta eficiência em reduzir e simplificar etapas dos processos que não criam valor permitindo às empresas atingir os seus objetivos através de uma melhoria contínua concentrando-se em aumentar a produtividade e conseqüentemente diminuir os custos. A redução dos desperdícios consegue-se por meio da introdução de ferramentas *Lean* de fácil aplicação e manutenção. A intensa competitividade existente, e significativa transformação no mercado fizeram desenvolver diversas ferramentas ao longo dos anos (Lopes *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017).

A escolha das ferramentas é fundamental para uma implementação permanente e sustentável da FL nas empresas. Para implementar os princípios desta filosofia, uma variedade de técnicas e ferramentas são utilizadas para auxiliar a sua aplicação. A Tabela 3.1 apresenta algumas das inúmeras ferramentas *Lean*, assim como outras ferramentas de apoio importantes para o desenvolvimento da tese (Lopes *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017).

Tabela 3.1 – Tabela resumo das ferramentas da Filosofia *Lean* e outras ferramentas de apoio.

Denominação	Descrição
5S	Esta ferramenta tem como objetivo assegurar a arrumação, a organização e a limpeza do espaço de trabalho, de modo a criar um ambiente saudável e qualidade para todos que convivem na organização (Lopes <i>et al.</i> , 2015; Rewers <i>et al.</i> , 2016; Oliveira <i>et al.</i> , 2017).
Diagrama de Ishikawa	Também conhecido por diagrama causa efeito ou espinha de peixe (pela forma do diagrama), é um diagrama que permite refletir a relação de um problema e as causas que contribuem para que este exista (Luca <i>et al.</i> , 2017; Statsenko <i>et al.</i> , 2021).
Diagrama de Pareto	Este diagrama tem o aspeto de um gráfico de barras que mostra as causas ou problemas em ordem de prioridade, identifica os fatores mais significativos e mostra informação de forma a evidenciar a priorização de temas (Hossen <i>et al.</i> , 2017; Statsenko <i>et al.</i> , 2021).
Plan – Do – Check – Action (PDCA)	O PDCA é uma ferramenta da qualidade utilizada no controlo de processos, a fim de solucionar os problemas ou identificar os pontos de melhoria necessárias em tempo adequado. O PDCA apresenta uma sequência de atividades que devem de ser executadas de maneira eficaz para análise e prognóstico dos problemas organizacionais e definir as ações a serem implementadas (Chakraborty, 2016).
Kaizen	Esta metodologia procura eliminar qualquer tipo de desperdício nas organizações de forma gradual e contínua, com o intuito de aumentar a produtividade, sendo que a sua meta é o aperfeiçoamento dos processos (Chan & Tay, 2018; Kumar <i>et al.</i> , 2018).
Jidoka	Este conceito consiste na automação das máquinas, e forma a permitir um maior rendimento e controlo dos processos. Para além disso, permite que um operador seja autónomo para parar a produção quando é detetada uma anomalia (Da Silva, 2016; Rewers <i>et al.</i> , 2016; Tekin <i>et al.</i> , 2019).
Just-in-Time	O JIT tem como foco principal a eliminação transversal dos desperdícios, assim como possibilita a melhoria contínua, e baseia-se em produzir somente o que for necessário, na quantidade certa e com a qualidade garantida (Hussein & Zayed, 2021; Milewski, 2022).
Kanban	O sistema <i>Kanban</i> é um sistema de informação que permite controlar a produção de toda a fábrica, ou seja, dá autorizações de produção, de transporte e informa a localização de componentes através de cartões (Rewers <i>et al.</i> , 2016; Oliveira <i>et al.</i> , 2017).
Brainstorming	O <i>Brainstorming</i> tem como princípio básico gerar ideias num curto espaço de tempo entre um grupo de pessoas, onde cada um apresentará a sua ideia sobre um determinado problema em estudo (Al-Samarraie & Hurmuzan, 2018).
Value Stream Mapping (VSM)	VSM é uma ferramenta que por meio de símbolos padrão tem como função representar todas as operações do processo produtivo que acrescentam ou não valor (Oliveira <i>et al.</i> , 2017; Kumar <i>et al.</i> , 2018).
Gestão Visual	A gestão visual permite melhorar a eficiência dos processos ao torná-los mais visíveis, lógicos e simples (Oliveira <i>et al.</i> , 2017; Jorge & Peças, 2018).

Tabela 3.2 – Tabela resumo das ferramentas da Filosofia *Lean* e outras ferramentas de apoio. (cont.)

Denominação	Descrição
<i>Poka – Yoke</i>	São dispositivos à prova de erros que ajudam no controlo da qualidade, tendo como principal objetivo eliminar a perda decorrente do fabrico de produtos defeituosos (Rewers <i>et al.</i> , 2016; Lazarevic <i>et al.</i> , 2019).
<i>Single Minute Exchange of Die (SMED)</i>	SMED ou Troca rápida de ferramentas é uma metodologia que abarca um conjunto de técnicas que visam melhorar o tempo de <i>Setup</i> tornando possível a realização de trocas de ferramentas em menos de dez minutos (Rewers <i>et al.</i> , 2016; Oliveira <i>et al.</i> , 2017).
<i>5W2H – Plano de ação</i>	Esta ferramenta é usada como um método eficiente no auxílio de abordagem na sistemática dos processos que por meio de sete questões, descreve o problema, define como este afeta o processo, as pessoas e as consequências posteriores a estas situações (Neves <i>et al.</i> , 2018; Ventura & Suquizaqui, 2019).
<i>Standard Work</i>	O <i>Standard Work</i> consiste no desenvolvimento de normas de trabalho para garantir que as atividades sejam realizadas numa determinada sequência e num determinado intervalo de tempo (Oliveira <i>et al.</i> , 2017; Chan & Tay, 2018).
<i>Lição Ponto a Ponto (LPP)</i>	<p>As LPP possibilitam a transmissão de conhecimento de uma forma prática, simples e rápida. Estas lições permitem uma aprendizagem personalizada, adaptável a cada tema ou assunto a aprender. Sendo as LPP muito utilizadas de suporte na formação e treino na Manutenção Autónoma, é importante que as lições comecem a ser postas em prática logo no primeiro passo da implementação deste pilar (Joochim & Meekaew, 2019; Chintada & Umasankar, 2022). As referidas lições são classificadas da seguinte forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conhecimentos básicos: resumo das competências necessárias para o desenvolvimento das atividades de TPM e de produção que devem de ser levadas a cabo diariamente. • Casos de melhoria: tem como objetivo a divulgação da informação resumida à cerca das medidas adotadas e respetivos efeitos. • Casos de problemas: tem como objetivo prevenir a reincidência, indicando os pontos principais nos quais se devem de ter em conta. • Outros: são utilizados para apresentar outras situações ou informações relevantes. <p>A maioria dos defeitos encontrados nas máquinas é consequência do cúmulo de pequenas causas, entre elas a falta de conhecimento dos operadores. Sendo assim, deve-se de proporcionar treino pratico e teórico de elementos básicos aos operadores, seguindo os seguintes pontos: “O que é o elemento?”, “Para que serve?”, “Como funciona?”, “Onde é usado?”, “O que pode provocar problemas neste elemento?”, “Como evitar os problemas?”.</p> <p>De forma a verificar as competências adquiridas deve-se de criar uma matriz de competências, na qual indica a competência atual de cada um dos operadores nas diferentes áreas, bem como a competência que lhes é desejada. Permitindo assim, fornecer as competências necessárias a cada um destes.</p>

Tabela 3.3 – Tabela resumo das ferramentas da Filosofia *Lean* e outras ferramentas de apoio. (cont.)

Denominação	Descrição
TPM	A TPM designa um conjunto de técnicas com o intuito de melhorar a eficiência das operações através de atividades relativas à manutenção de máquinas e equipamentos na sua melhor condição técnica e limpeza, efetuadas pela participação total dos trabalhadores (Melo & Loos, 2018; Singh & Singh, 2020).
Heijunka	É uma técnica que consiste em nivelar a produção em termos de volume e variedade. Assim, esta técnica permite estabilizar a produção, eliminando sobrecarga de pessoas e/ou equipamentos, bem como <i>Lead Time</i> longos, e permite a produção de pequenos lotes de acordo com o que o cliente procura.
Bottleneck Analsis	É uma ferramenta que permite analisar qualquer parte do processo produtivo que estejam a causar constrangimentos, atrasos ou a redução no fluxo do trabalho. A análise do constrangimento pode contribuir para identificar o ponto exato ao longo do sistema produtivo que está a causar o respetivo bloqueio, e trabalhar em ações para os mitigar.
Gemba	<i>Gemba</i> é uma ferramenta que se refere ao facto de fazer observações no chão de fábrica, ou seja, ir ao chão de fábrica e observar o que está a acontecer com a finalidade de investigar e observar as atividades, tarefas e fluxos de trabalho de um processo específico.
Hoshin Kanri	É uma metodologia que serve para aumentar o grau de flexibilidade das empresas e diminuir o tempo de resposta às mudanças do ambiente. Tem por base a gestão da qualidade total, procurando alinhar as funções e atividades dos vários níveis organizacionais com os objetivos estratégicos.

3.3. Principais Indicadores a Utilizar na Aplicação do Modelo

O controlo da manutenção é imprescindível tal como em qualquer outra atividade produtiva. São utilizados indicadores para fazer o controlo da manutenção. Estes permitem verificar a evolução ao longo do tempo de um serviço da manutenção (Shohet & Nobili, 2017; Ferreira *et al.*, 2019).

Os indicadores de desempenho ou *Key Performance Indicators* (KPIs) na atividade de manutenção são dados numéricos estabelecidos sobre determinados processos que se deseja controlar, estabelecer metas futuras e verificar o seu compromisso, ou seja, estes são estabelecidos com o objetivo de dar suporte à gestão, de forma a atingir a excelência da manutenção (Mohammad-Amini *et al.*, 2021; Rediske *et al.*, 2022).

Os KPIs ajudam a determinar várias relações, como os custos inerentes ao departamento de manutenção, o desempenho de atividades e tarefas relacionadas com

este e os benefícios que, em termos de ganho, eficácia e produtividade, são obtidos com a intervenção da manutenção (Khan & Bilal, 2019).

Cada indicador expressa o nível do desempenho que realmente foi atingido quer seja a nível global, ou individual como a determinação do desempenho de uma determinada máquina, ajudando na direta e transparente comparação entre objetivos de gestão e resultados obtidos, simplificando uma situação, que de outro modo, seria relativamente complexa (Kang *et al.*, 2016; Lambán *et al.*, 2022).

O uso dos indicadores está assente no princípio base da boa gestão, onde só se consegue gerir o que se consegue medir. O primeiro passo será a definição dos objetivos a alcançar em todos os sectores da organização relacionados com a manutenção e a partir daí selecionar ou criar métricas que permitirão a análise, medição e avaliação. Por este facto é importante referir alguns das principais métricas da gestão da manutenção e produção utilizados nesta investigação (Raza *et al.*, 2016; Gonzalez *et al.*, 2017):

$$\text{Tempo total de observação} = n^{\circ} \text{ de horas em observação, ou seja, } n^{\circ} \text{ de horas de cada turno} \quad (1)$$

$$\text{Tempo requerido da máquina} = n^{\circ} \text{ de horas de cada turno} - \text{Tempo de interrupção} \quad (2)$$

$$\text{Tempo de funcionamento da máquina} = \text{Tempo requerido da máquina} - (\text{Tempo de Paragens próprias} + \text{Tempo de Paragens induzidas}) \quad (3)$$

$$\text{Disponibilidade operacional} = \text{Tempo de funcionamento} / (\text{Tempo de funcionamento} + \text{tempo de paragens próprias} + \text{tempo de paragens induzidas}) \quad (4)$$

$$\text{Rendimento operacional} = \text{tempo de funcionamento para as peças boas à primeira} / \text{tempo requerido} \quad (5)$$

$$\text{Perdas devidas a não qualidade} = N^{\circ} \text{ de peças não conformes} / \text{número de peças teoricamente realizáveis durante o tempo requerido} \quad (6)$$

$$\text{Perdas devido a paragens próprias} = \text{Tempo de paragens próprias} / \text{Tempo requerido} \quad (7)$$

$$\text{Perdas devido a paragens induzidas} = \frac{\text{Tempo de paragens induzidas}}{\text{Tempo requerido}} \quad (8)$$

Em suma, os KPIs surgem como uma ferramenta de extrema importância para melhorar a tomada de decisão de diferentes empresas. Contribuem para um modo de atuação sustentável ao maximizarem a gestão dos recursos, assegurando simultaneamente a competitividade (Mourtzis *et al.*, 2018; Hristov & Chirico, 2019).

3.4. Gestão da Manutenção *Lean*

A ML é uma abordagem que avalia de forma constante os desperdícios das atividades da manutenção, sendo importante para esta área. O sistema produtivo interage com diversas áreas de uma empresa, sendo a área da manutenção uma peça fulcral e de apoio à área da produção. Pois, é pela manutenção que é possível manter o bom funcionamento do sistema produtivo. Esta atividade que nos dias de hoje é fundamental nas empresas não ficou imune às constantes revoluções industriais, bem como ao nível de exigência por parte dos clientes cada vez mais exigentes, seguidores de modas e tendências, tendo de se adaptar a uma nova realidade produtiva e competitiva, cada vez mais global (Yile *et al.*, 2008; Mostafa *et al.*, 2015).

Para reduzir os custos e melhorar os processos de produção, muitas empresas têm adotado filosofias. A FL pode ser facilmente utilizada na área da manutenção e produção. Quando aplicada na manutenção é denominada de ML (Yile *et al.*, 2008; Mostafa *et al.*, 2015).

A ML representa a adoção de princípios *Lean* nas operações de manutenção, reparação e revisão. O objetivo principal da ML é garantir a fiabilidade dos equipamentos, também contribui para reduzir o tempo de inatividade não programada, pela melhoria das atividades de apoio e custo de manutenção, assim como a criação de medidas de desempenho e garantir a eficácia do trabalho (Gupta *et al.*, 2017; Hassan *et al.*, 2020; Antosz *et al.*, 2021).

A ML é uma operação de manutenção proativa que integra as atividades programadas e planeadas da manutenção, fundamentadas no TPM utilizando estratégias de Manutenção centradas na fiabilidade e praticadas por equipas qualificadas e por técnicos polivalentes que promovem a formação, a manutenção autónoma e desenvolvimento de competências e a melhoria contínua (Gupta *et al.*, 2017; Hassan *et al.*, 2020; Antosz *et al.*, 2021).

Estas atividades são apoiadas por um sistema computadorizado de gestão da manutenção ou *Computerized Maintenance Management Systems* (CMMS). O CMMS permite obter informação relativamente ao controlo de *stocks* e de compras, planeamento, controlo e supervisão das atividades da manutenção de diversas máquinas e equipamentos (Gupta *et al.*, 2017; Hassan *et al.*, 2020; Ivina & Olsson, 2020; Antosz *et al.*, 2021; Xiang & Chin, 2021).

As tarefas de manutenção são suportadas pelo sistema de gestão de materiais que fornece as peças e os materiais necessários com base no JIT, ou seja, fornece no momento certo nem demasiado cedo nem demasiado tarde. A engenharia de manutenção identifica as causas das falhas, analisa as partes inoperacionais dos equipamentos, a eficácia das atividades da manutenção e define as ações de manutenção preditiva (Ivina & Olsson, 2020; Antosz *et al.*, 2021; Xiang & Chin, 2021).

A ML elimina o desperdício através da redução ou eliminação da indisponibilidade das máquinas e equipamentos devido à ocorrência de avarias, podendo estes estar na condição de espera, ou seja, aguarda reparação ou em reparação (Ivina & Olsson, 2020; Xiang & Chin, 2021).

Para obter sucesso na implementação da ML existem metodologias que auxiliam na sua implementação como o VSM, 5S, Gestão Visual, TPM, OEE, *Kaizen*, *Poka-Yoke*, *Kanban*, entre outros (Ivina & Olsson, 2020; Xiang & Chin, 2021).

3.4.1. Princípios da Gestão da Manutenção *Lean*

A FL implica qualidade à primeira, melhoria contínua e resolução de problemas para além do foco na eliminação de desperdícios e no cliente. Com o objetivo de eliminar os desperdícios, de modo a tornar a empresa mais flexível e capaz de responder às necessidades dos clientes, entregando produtos e serviços no menor tempo possível, com qualidade e baixo custo, assim este conceito foi formalizado de forma mais exata com os princípios da FL. Com isto, pode-se dizer que esta filosofia tem como principal objetivo a eliminação de desperdícios e, conseqüentemente, unir as etapas que realmente acrescentam valor ao produto (Mostafa *et al.*, 2015; Duran *et al.*, 2017; Korchagin *et al.*, 2022).

Os sete princípios da FL e a sua aplicação na gestão da manutenção são explicados a seguir (Figura 3.2) (Mostafa *et al.*, 2015; Duran *et al.*, 2017; Korchagin *et al.*, 2022):

Conhecer o cliente: Quem é o cliente da manutenção?

De modo a definir valor e trabalhar no sentido de prestar um serviço único é necessário conhecer a quem serve a manutenção. Os clientes da área da manutenção são a produção, os operadores dos equipamentos, os restantes colaboradores da empresa, assim como o cliente final.

Definir valor: Que valor espera o cliente receber da manutenção?

O cliente pretende zero avarias, zero acidentes, zero paragens. Também pretende o decréscimo do tempo não produtivo, como dos custos, assim como do aumento na eficiência das operações. O envolvimento da manutenção no planeamento, desenvolvimento dos processos e equipamentos.

Analisar a cadeia de valor: Quais as etapas envolvidas na criação de valor que a manutenção entrega aos seus clientes?

Refere-se às operações de manutenção, assim como todas as suas atividades diretas e de suporte, de toda a cadeia de valor para assim reconhecer quais são as que realmente contribuem para revelar e combater os desperdícios.

Melhoria dos fluxos: quais os fluxos de informação, materiais e de pessoas de forma a acelerar os processos de criação de valor?

Identificar, assim como melhorar os fluxos de informação quer seja de materiais e pessoas de modo a facilitar os processos de criação de valor através da eliminação de desperdícios. Todos os constrangimentos e obstáculos devem ser identificados e eliminados (exemplo: processos demasiados complexos, tempo de espera, subutilização de recursos, etc.).

Aplicar a lógica *Pull*: De que forma a lógica *Pull* auxilia a conexão entre a manutenção e o cliente?

A lógica *Pull* pode ser utilizada quer à gestão de materiais como às peças de reserva, evitando a acumulação de material e o custo associado a este, ou aplicado à gestão de fornecedores quer seja de materiais e serviços. No que concerne à manutenção, devem ser estabelecidas prioridades relativamente às atividades a realizar nos equipamentos que estão na linha de produção, assim como as tarefas que auxiliam nas especificações de tolerância e/ou qualidade da produção.

Procurar a perfeição: Qual é a melhor postura a adotar?

A mudança de mentalidade e cultura por parte dos colaboradores da empresa é vital. Assim, inculcar aos vários colaboradores e técnicos de manutenção a constante necessidade de melhorar o desempenho por meio da utilização de ferramentas e metodologias sistemáticas que promovam práticas e atitudes proativas perante a manutenção, adotando os princípios de melhoria contínua é importante.

Inovar sempre: Os desenvolvimentos tecnológicos são tidos em conta?

A área da manutenção deve estar a par e em consonância com a evolução tecnológica. Esta adaptação pode oferecer novas oportunidades quer de melhoria nos serviços de manutenção, como também pode contribuir para a redução de custos. Assim, procurar novas práticas de gestão alicerçadas nas novas tecnologias, identificar a melhoria dos processos, produtos e/ou serviços, é relevante para a contribuição do desempenho da manutenção e da empresa.

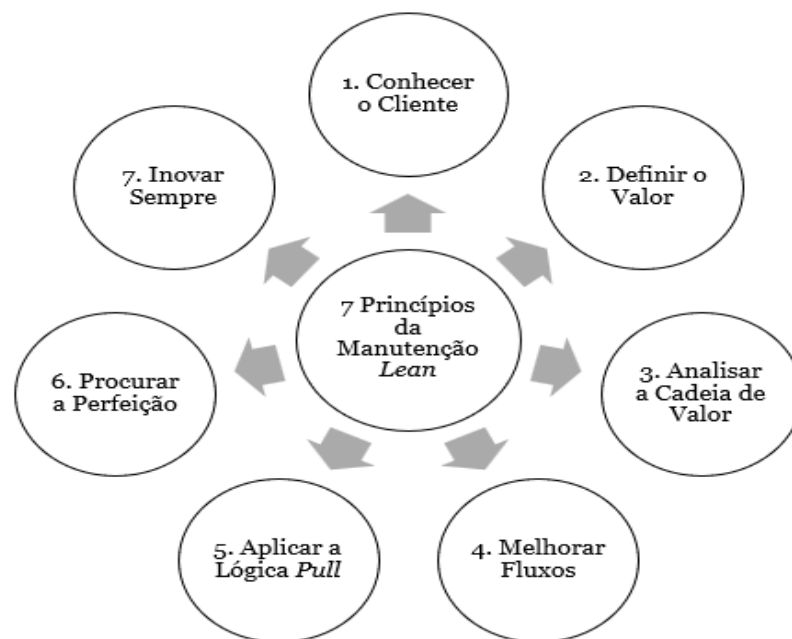


Figura 3.2 – Sete princípios da ML (Adaptado de Carvalho & Navas, 2019).

3.4.2. Desperdícios na Manutenção

O primeiro passo na ML é identificar os tipos de desperdícios existente no processo de manutenção. Este conceito pode ser útil tanto na manutenção bem como na produção.

O desperdício significa todas as atividades que não acrescentam valor ao produto na perspetiva do cliente e que este não está disposto a pagar. Neste sentido, a definição de desperdício está relacionada com o conceito de valor. Assim, a melhor forma de

reconhecer os desperdícios é identificar e distinguir as atividades que acrescentam valor daquelas sem qualquer valor acrescentado (Carvalho & Navas, 2019; Cordeiro, 2019; Ivina & Olsson, 2020).

Manutenção improdutiva

Realizar tarefas de manutenção de forma excessiva, ou seja, mais do que necessárias e em intervalos mais frequentes do que realmente necessárias. Também podem ocorrer porque os componentes são substituídos demasiado cedo dando lugar a superprodução do trabalho de manutenção. Isto deve-se pela falta de motivação dos colaboradores ou pelo mau planeamento das horas de trabalho (Baluch *et al.*, 2012; Carvalho & Navas, 2019; Ivina & Olsson, 2020).

Espera por recursos da Manutenção

O departamento da produção está à espera de que os técnicos da manutenção executem o serviço de manutenção. Envolve esperar por ferramentas, máquinas, peças, trabalhadores, documentação de peças e pela compra de ferramentas ou materiais. Este desperdício também se dá pelas interrupções das atividades pela falta de peças e/ou materiais e pelas deslocações aos armazéns e/ou oficinas, causando atrasos e tempos de espera diversos. Com estas esperas não se acrescenta valor pelo que devem ser eliminadas ou reduzidas (Carvalho & Navas, 2019; Cordeiro, 2019).

Má gestão do *Stock*

Refere-se à falta da capacidade de ter o material certo no momento certo. É considerada o material obsoleto, assim como o *stock* em excesso já que significa um capital investido e um consumo de recursos para a sua gestão. Um *stock* elevado resulta para o trabalho da manutenção uma resposta lenta, quebras inesperadas e uma alta percentagem de mão de obra reativa (Carvalho & Navas, 2019; Ivina & Olsson, 2020).

Transporte excessivo

Centralização de *Maintenance, Repairs and Operating Supplies* (MRO) ou manutenção, reparação e abastecimento operacional fica longe das zonas de trabalho, comumente materiais que é repetitivamente usado e não estão preparados, documentação que deve ser procurada, ordens de serviços para máquinas que não estão disponíveis, todos causam excesso de transporte. Portanto, os colaboradores da

manutenção passam mais tempo em movimento e em transporte, o que não agrega valor ao processo (Baluch *et al.*, 2012; Carvalho & Navas, 2019; Cordeiro, 2019).

Deslocações desnecessárias

Surge pela falta no local certo de ferramentas, peças, documentos, assim como dos materiais imprescindíveis para realizar a função da manutenção, já que implica tempo perdido e movimentações de ida e de volta. Estas referem-se a pessoas e estações de trabalho móveis com ferramentas e materiais sem motivo aparente (Carvalho & Navas, 2019; Cordeiro, 2019; Ivina & Olsson, 2020).

Repetição de trabalho

Surge pela necessidade de voltar a realizar o que foi mal feito na primeira vez, bem como pela necessidade de fazer tarefas adicionais pela falta da mão-de-obra ou qualificações (Baluch *et al.*, 2012; Carvalho & Navas, 2019).

Subutilização de recursos

Ocorre pela falta de comunicação entre os técnicos e operários na obtenção do *feedback* e como consequência a incapacidade de melhorar os processos. Em termos de manutenção, negligência na aplicação e manuseio dos equipamentos, isto leva a realizar tarefas que não acrescentam valor (Carvalho & Navas, 2019; Cordeiro, 2019; Ivina & Olsson, 2020).

Ineficaz gestão de dados

Isto deve-se a uma recolha de dados que não são necessários, como também a uma recolha de dados indispensáveis e que não são tratados. Recolher dados de forma inadequada que não são vitais torna-se num desperdício já que se trata de trabalho que deveria ser corrigido e ser repetido (Baluch *et al.*, 2012; Carvalho & Navas, 2019; Cordeiro, 2019).

Capítulo 4

Indústria 4.0

No presente capítulo é apresentado o conceito da Indústria 4.0, a sua caracterização, bem como os seus pilares e princípios. Ainda neste capítulo são analisadas as sinergias resultantes da Indústria 4.0 quer seja com a FL ou com a Manutenção.

4.1. Caracterização da Indústria 4.0

Uma revolução industrial é o resultado de um período de avanços das inovações tecnológicas acompanhado por grandes mudanças na indústria ao longo de décadas, que tem impacto não só a nível tecnológico, mas também a nível económico, social e político (Wang *et al.*, 2016; Dobrzański, 2019).

Até à data a indústria tem passado por várias revoluções a primeira revolução foi originada pela substituição do método de produção artesanal pelo método de produção mecânica, através da introdução da máquina a vapor. Pelo que, a força humana passou a ser substituída pela força mecânica vinda da água e do vapor, que eram capazes de movimentar essas mesmas máquinas (Deuse *et al.*, 2020; Freitas *et al.*, 2020).

A segunda revolução industrial ocorreu entre os séculos XIX e XX impulsionada pela Segunda Guerra Mundial e esta ficou caracterizada pela introdução das linhas de montagem que tornou possível a produção em massa, aumentando significativamente a produção de diversos produtos. A eletricidade também chegou às residências das pessoas, trazendo muitas mudanças nas suas vidas. Graças à energia elétrica, diversas tecnologias surgiram nessa época, tais como o rádio, telefone, televisão, eletrodomésticos, iluminação, que foram capazes de mudar completamente o estilo de vida das pessoas (Birkinbine, 2020; Nota *et al.*, 2021).

A terceira revolução industrial ocorreu na década de 1980, esta ficou caracterizada pela mudança do analógico para o digital onde surgiram várias tecnologias como a automação, eletrónica, computadores e Tecnologia de Informação (TI) e ainda a difusão dos robôs no seio das indústrias, ficando conhecida como a revolução digital. Esta também ficou marcada pelo avanço das tecnologias e informática no sistema de

produção industrial, visando a redução de custos e o tempo de produção (Sharma & Singh, 2020; Moll, 2021).

Após as três últimas revoluções industriais, tem-se a quarta revolução industrial, a era que hoje vivemos, cujo principal elemento é a introdução de tecnologias de internet, propondo a integração de máquinas e componentes inteligentes (Sharma & Singh, 2020; Moll, 2021).

A quarta revolução industrial teve o seu início na Alemanha, em 2011, sob o conceito: “Indústria 4.0”. Este termo está relacionado à crescente digitalização e integração das fábricas, que devem possibilitar a criação das chamadas “fábricas inteligentes”. A abordagem fundamental da Indústria 4.0 (I4.0) relaciona Sistemas físicos cibernéticos ou *Cyber-Physical System* (CPS), Internet das coisas ou *Internet of Things* (IoT), internet dos serviços ou *Internet of Services* (IoS) e fábricas inteligentes ou *Smart Factories* (SF) (Kasza, 2019; Ikeziri *et al.*, 2020).

Nos dias de hoje, com o constante desenvolvimento de tecnologias inovadoras as fábricas têm adquirido novas formas de gestão criando um ambiente produtivo diferente que converge entre o mundo real e virtual. Os objetos no mundo real nos dias de hoje possuem tecnologias e habilidades fornecidas por CPS, como sensores e atuadores que permitem a monitorização dos processos físicos em tempo real, criam uma cópia virtual do mundo físico-real e tomam decisões descentralizadas. Estes objetos são integrados, comunicam-se, trocam dados, cooperam entre si e com os seres humanos em tempo real e em uma rede sem fios através da IoT e IoS (Cañas *et al.*, 2021; Alcácer *et al.*, 2022).

4.2. Os Pilares da Indústria 4.0

A I4.0 está amplamente ligada na melhoria contínua em termos de eficiência, segurança, produtividade das operações. Tem como principais objetivos o aumento da qualidade dos produtos, a redução dos tempos de entrega, o desenvolvimento de produtos e serviços inovadores, tornando assim a indústria mais eficiente. São nove as tecnologias e tendências facilitadoras disponíveis que serão descritos seguidamente (Figura 4.1) (Rüßmann *et al.*, 2015; Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

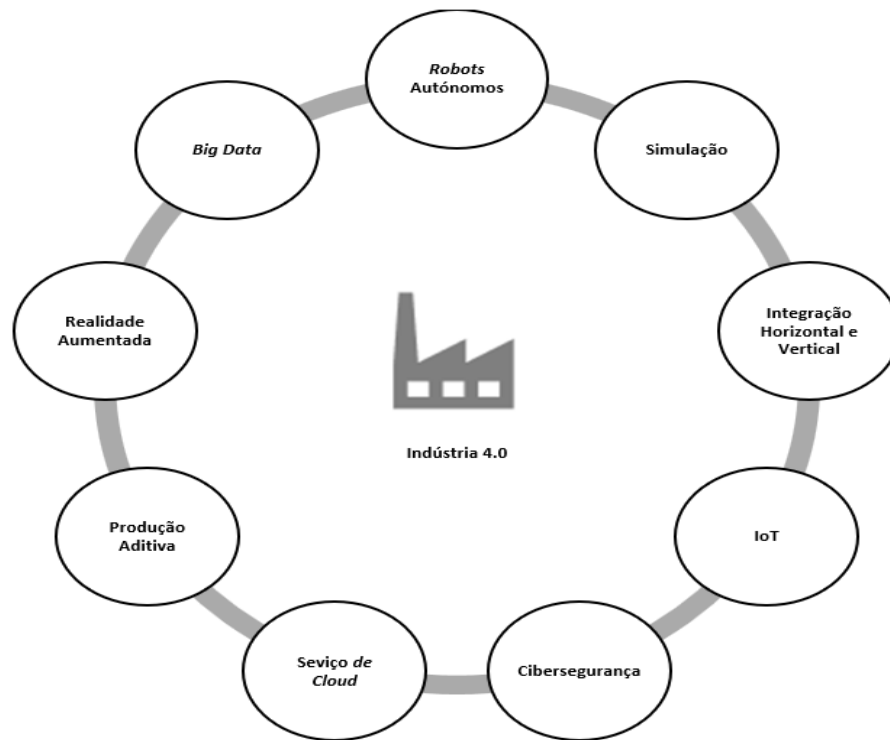


Figura 4.1 – Os 9 Pilares da Indústria 4.0 (adaptado pelo autor de Rüßmann *et al.*, 2015).

Internet of Things

A IoT pode ser definida como uma tecnologia para a informação, capaz de conectar todos os subsistemas, processos e objetos, redes de fornecedores e de clientes, num sistema interligado em rede. Esta permite que as trocas de informação sejam feitas em tempo real, de forma a gerar comunicação e cooperação dinâmica. Também permite a recolha de dados que é feita por meio de uso de redes de computadores ou conexões sem fios. Os dados obtidos das máquinas, produtos, ou linhas de produção compreendem uma enorme quantidade de dados estatísticos que podem ser partilhados e analisados. A IoT permite que vários objetos tais como *Radio Frequency Identification* (RFID) identificação por radiofrequência, sensores, *smartphones*, e vários outros objetos por meio de um protocolo padrão sejam capazes de conectar à internet, para interagirem e trocarem dados entre si, realizando assim a identificação, localização, monitorização e gestão de forma inteligente para alcançarem objetivos comuns (de Lima & Pinto, 2019; Portilho *et al.*, 2020).

No contexto da I4.0, a IoT é fundamental já que possibilita por meio de sensores e dispositivos eletrónicos a conexão entre máquinas, permitindo e facilitando a centralização e automação do controlo de produção, ajudando-a a tornar numa indústria inteligente (de Lima & Pinto, 2019; Portilho *et al.*, 2020).

Big Data

O *Big Data* é um termo que descreve a grande quantidade de dados gerados e armazenados diariamente pela empresa, já que as bases de dados tradicionais não possuem capacidade de obter, armazenar e interpretar os dados em tempo real. A recolha de dados só é possível com a utilização de sensores e processadores integrados aos sistemas de produção. O *Big Data* armazena todos os dados considerados relevantes e processa-os com o intuito de os transformar em conhecimento, estes dados podem ser utilizados diretamente pelas máquinas assim como pelos gestores, que passaram a ter mais informação para utilizar nas tomadas de decisão para agregar valor na indústria do futuro (Amicabile da Matta *et al.*, 2023; Sousa, 2023).

Robôs autónomos

Os robôs da quarta revolução industrial tornaram-se mais complexos, flexíveis e cooperativos, podendo aprender a tomar decisões sozinhos, com base em tarefas que realizaram através da inteligência artificial podendo assim aprimorar ainda mais as tarefas que executam. Este conceito apresenta algumas vantagens como o aumento na quantidade e na qualidade dos produtos, além da melhoria na gestão de recursos, mediante o uso eficiente dos insumos em toda a cadeia produtiva (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Amicabile da Matta *et al.*, 2023; Sousa, 2023).

Simulação

A simulação é uma técnica que permite a imitação do funcionamento de um sistema real. Com recurso a um *software*, é possível analisar o desempenho de um sistema, conseguindo construir modelos nos quais é possível visualizar o funcionamento do sistema em estudo. Assim, a simulação ajuda a projetar produtos, prever problemas e fazer adaptações com o uso de um dispositivo eletrónico minimizando erros nas indústrias. A partir dos resultados simulados, os atuadores modificam as operações para as respostas do mundo físico que gera variáveis e dados no mundo virtual, prevendo e acompanhando os processos e operações (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Shaheen & Németh, 2022).

Integração horizontal e vertical

Esta tecnologia é considerada um dos primeiros passos a implementar na I4.0, já que permite a gestão dentro da estrutura organizacional, objetos físicos, sistemas de informação nos quais são relevantes para a sua análise. Neste sentido, a integração

vertical permite atuação de sistemas de TI nos diferentes níveis hierárquicos da indústria, para assim gerar uma organização automatizada. Portanto, uma das características desta integração, é a possibilidade de um sistema customizado, de acordo com as determinações do cliente. Por outro lado, a integração horizontal refere-se à conexão entre as atividades internas e as partes interessadas de uma empresa (*Stakeholder*), podendo inclusive conectar outras empresas no âmbito nacional e internacional (Vaidya *et al.*, 2018; Marciano *et al.*, 2019).

Serviços de *Cloud*

Na I4.0 a partilha de dados entre toda a cadeia de valor é um desafio a ser superado devido à grande quantidade de dados gerados por todo o sistema. Os serviços da *Cloud* têm a capacidade de armazenar e aceder aos dados sem que os mesmos necessitem de ficar armazenados no dispositivo eletrónico que está a ser utilizado. A computação em nuvem deve ser capaz de melhorar a funcionalidade das máquinas e também a prestação de serviços, pois deve minimizar os tempos de resposta entre operações. Outro dos aspetos fundamentais é a acessibilidade aos distintos elementos das linhas de produção de forma remota, podendo controlar, modificar e restaurar os sistemas que sejam necessários, sem necessidade de deslocação dos técnicos *in situ* (Aceto *et al.*, 2020; Alcácer *et al.*, 2022).

Cibersegurança

Devido à quantidade massiva de dados e dispositivos conectados é imprescindível um sistema protegido e confiável para acompanhar o desenvolvimento tecnológico, integrado e autónomo. A cibersegurança envolve a maneira de prevenir as ameaças sobre os sistemas industriais e as linhas de produção, garantindo que os dados recolhidos pelas tecnologias fiquem protegidos, tanto de falhas durante a transmissão dos dados, como de ataques externos. Para isto, normalmente utiliza-se a criptografia, para codificar arquivos e proteger informações, como também protocolos de comunicação. Como resultado tem-se comunicações seguras, bem como uma gestão sofisticada de identidades (Thames & Schaefer, 2017; Culot *et al.*, 2019).

Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva é uma tecnologia que tem como o princípio básico de funcionamento, a criação de objetos tridimensionais (3D) através de adição de material camada a camada em vez de processos de maquinagem. Estes equipamentos não se restringem somente à produção de modelos, mas também à produção final de

processos. Com o uso desta tecnologia na I4.0 adiciona flexibilidade podendo assim ser usada na produção de pequenos lotes e produtos personalizados, reduzindo o desperdício de material, assim como, o tempo de produção em pequena escala, alcançando as vantagens competitivas e o aumento no nível de serviços ao cliente, pois possibilitará a construção de peças e componentes com arquiteturas complexas, com materiais mais leves e resistentes (Silva *et al.*, 2020; Alcácer *et al.*, 2022).

Realidade Aumentada

A realidade aumentada é uma tecnologia de computação gráfica que combina um entorno real e digital colocando objetos virtuais no mundo real, através do uso de óculos de realidade aumentada ou *smart glass*. A utilização desta tecnologia apresenta a capacidade de reproduzir e reutilizar conhecimentos e dados digitais que permitem aumentar a informação de um processo, podendo a pessoa que as utiliza dispor de dados em tempo real para facilitar o seu trabalho. A realidade aumentada pode ser aplicada para fornecer aos funcionários informação em tempo real de modo a melhorar a tomada de decisão e os procedimentos de trabalho através de dispositivos, esta também pode ser aplicada para visualizar relatórios em tempo real, treino e demonstração de produtos para os clientes (Fraga-Lamas *et al.*, 2018; Blanco-Novoa *et al.*, 2018).

4.3. Princípios da Indústria 4.0

A I4.0 advém de seis princípios que contribuem para a aplicação bem-sucedida da mesma. Seguidamente, é apresentada uma breve explicação sobre cada um dos seis princípios (Dikhanbayeva *et al.*, 2020; Hall *et al.*, 2022).

Virtualização

A virtualização refere-se à capacidade dos CPS de simular e criar uma cópia virtual do mundo físico, podendo observar todos os processos da cadeia de valor, sem necessidade deslocarmos ao espaço físico, e que em caso de avaria pode fornecer dados úteis aos operadores. Estes modelos digitais das fábricas através da monitorização com sensores, modelos e simulação computacional, são um espelho da realidade já que são criados a partir dos dados recolhidos do ambiente. Esta versão virtual da realidade possibilita aos utilizadores receberem notificações de falhas, avisos e indicadores de máquinas, o que possibilita a tomada de decisão em relação aos produtos e aos próprios sistemas de

produção, e que em caso de avaria podem fornecer dados vitais aos operadores (Hermann *et al.*, 2015; Ghobakhloo, 2018).

Descentralização

A crescente complexidade e individualização na produção, torna a mudança de padrões de controlo centralizado. Assim surge uma nova forma de tomar decisões por meio da descentralização. A descentralização permite aos CPS executarem as suas tarefas de forma mais autónoma e independente possível, de acordo com as necessidades de produção em tempo real, ou seja, este princípio é compreendido como a maior capacidade de empresas, operações específicas, bem como máquinas tomarem decisões próprias (Sanders *et al.*, 2016; Marques *et al.*, 2017).

Interoperabilidade

Neste novo cenário, quer as empresas, como o CPS e os humanos estão conectados à IoT e à IoS, dando lugar a que as empresas, pessoas e sistemas computacionais possam interagir para trocar dados de maneira eficaz e eficiente. Os padrões serão um fator chave de sucesso para a comunicação entre o CPS e os fabricantes, exigindo de certa forma uma alta cooperação entre todos os setores, sendo este o primeiro passo para adoção de uma terminologia básica comum desta nova era industrial.

Apesar de se tratar de sistemas heterogéneos, que realizam funções diferentes, a troca de dados deve ocorrer de forma segura e íntegra. Estes sistemas podem pertencer a uma mesma empresa, ou a múltiplas, o que torna a padronização de troca de dados fundamental para o sucesso da comunicação (Burns *et al.*, 2019; Cañas *et al.*, 2021).

Modularidade

Os sistemas modulares são essenciais no mercado dinâmico da I4.0. Estes sistemas adaptam-se de forma flexível a mudanças de requisitos, introduzindo ou alterando módulos individuais, já que podem ser configurados facilmente em caso de alterações das características do produto ou flutuações sazonais. Desta forma, o processo torna-se passível de alterações com mais eficiência, menos perdas e de acordo com a procura (Dikhanbayeva *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021).

Capacidade em tempo real

Na I4.0, para realizar as tarefas organizacionais, é preciso que os dados sejam recolhidos em tempo real de forma instantânea garantindo capacidades de reação imediata diante de problemas de operação ou mudanças de procura. Desta forma, não é necessário estar fisicamente na empresa para tomar decisões, pois à distância, é possível aceder pelo sistema a tudo o que acontece na fábrica. A fábrica inteligente é capaz de tomar decisões, autonomamente, e de se adaptar às necessidades em tempo real, identificar uma falha numa operação para redirecionar as tarefas a outras máquinas operacionais, já que está configurada para parar e adaptar-se caso seja necessário em tempo real (Rosin *et al.*, 2020; Hall *et al.*, 2022).

Orientação para os serviços

As fábricas inteligentes são baseadas numa arquitetura orientada para os serviços, e consiste em customizar os *softwares* de acordo com a necessidade da empresa. Este princípio permite às empresas criarem uma ligação, entre os CPS da empresa, serviços, os sistemas inteligentes e operadores humanos, assim como com os clientes, facilitando a criação de sistemas através da IoS, o que permite que os produtos e serviços sejam produzidos consoante as especificações dos clientes (Ebrahimi *et al.*, 2019; Koh *et al.*, 2019).

Um processo disponibilizado na IoS pode ser utilizado internamente na empresa e também pode ser utilizado para outro processo completamente distinto ou fisicamente distante (Ebrahimi *et al.*, 2019; Koh *et al.*, 2019).

As empresas são flexíveis e ágeis e respondem às mudanças do mercado de forma muito mais célere do que costumavam fazer graças à orientação e a transformação do serviço (Ebrahimi *et al.*, 2019; Koh *et al.*, 2019).

4.4. Interação entre a Indústria 4.0 e a Filosofia *Lean*

Com o avanço da globalização nos dias de hoje, as empresas têm lidado com cenários dinâmicos e desafiadores, já que o cenário industrial tem testemunhado enormes mudanças (Sanders *et al.*, 2016; Aven & Zio, 2021).

As atividades de produção com o objetivo de responder às necessidades dos clientes, devem oferecer uma grande variedade de produtos, assim como a personalização destes. As empresas que pretendem continuar a oferecer produtos cada vez mais

inovadores, personalizados e de custo reduzido tem de adotar uma abordagem que seja capaz de alcançar estes atributos simultaneamente de forma a sobreviver neste cenário instável (Lai *et al.*, 2019; Varela *et al.*, 2019).

Portanto, a FL e a I4.0, são estratégias complementares de melhoria de processos que tendem a tornar possível trabalhar nas fábricas que tem de se adaptar de forma constante à volatilidade do mercado (Lai *et al.*, 2019; Varela *et al.*, 2019).

Embora a FL seja considerada como uma ferramenta essencial para controlar os desperdícios nos distintos processos, atualmente observa-se que esta já não é suficiente para atender às novas exigências do mercado, cada vez mais instável e competitivo. A automação na produção tem desempenhado um papel importante desde o início do desenvolvimento da FL, pelo que a I4.0 pode ser considerada como um avanço neste campo. Assim, além da automação, é necessário que esta seja realizada de forma integrada dada a crescente complexidade que os novos produtos e serviços tem de ter para poderem ser competitivos e atenderem ao que o mercado procura (Lai *et al.*, 2019; Varela *et al.*, 2019; Tissir *et al.*, 2020).

Para conseguir sobreviver e satisfazer as necessidades de um mercado cada vez mais volátil e exigente, as empresas têm de investir em tecnologias direcionadas para a I4.0, já que este modelo de gestão deve ser considerado como uma realidade para estas. As tecnologias que outrora eram vistas como algo distante e inacessíveis para a aplicação nos sistemas produtivos, nos dias de hoje, é algo presente em várias empresas contribuindo para resultados satisfatórios independentemente do tipo de produção (Valamede & Akkari, 2020; Sinha & Roy, 2020).

A FL e a I4.0 apesar de serem conceitos distintos, apresentam semelhanças e compartilham os mesmos objetivos gerais que passam pelo aumento de produtividade e flexibilidade. No entanto, a integração destes podem fornecer assistência de forma recíproca, já que as tecnologias da I4.0 podem apoiar durante a implementação da FL podendo eliminar certas barreiras que surjam na hora da implementação desta filosofia (Lai *et al.*, 2019; Varela *et al.*, 2019; Valamede & Akkari, 2020).

Por outro lado, quando a FL já se encontra implementada nas empresas, os níveis de adoção da I4.0 podem ser mais facilmente atingidos e, pode contribuir, para oferecer menor risco quando se pretende integrar as soluções inovadoras que este conceito oferece (Lai *et al.*, 2019; Varela *et al.*, 2019; Tissir *et al.*, 2020; Valamede & Akkari, 2020; Sinha & Roy, 2020).

Embora se possa pensar que estes dois conceitos não se possam integrar em conjunto pelas mais variadíssimas razões, a I4.0 não torna a FL obsoleta porque ambos conceitos, possuem uma dependência mútua e um domínio específico de aplicação, já que a FL facilita a implementação da I4.0. Pois, simplifica processos e elimina desperdícios, bem como contribui para o aumento da transparência dos processos (Maresova *et al.*, 2018; Tissir *et al.*, 2020; Valamede & Akkari, 2020; Sinha & Roy, 2020).

A FL não pode ser esquecida quando se aplicar elementos da I4.0, pois como referido anteriormente, estas tendem a convergir, pois ambas têm objetivos muito semelhantes. Porém o sistema de produção quando integra estes dois conceitos necessita de adaptações e incorporações que variam conforme, o tipo e estratégia de operações de cada empresa. Os ganhos serão tanto maiores conforme os custos inerentes às tecnologias utilizadas e conforme estes baixarem tornam o investimento mais acessível viabilizando a inclusão de outras tecnologias. As alterações dos sistemas produtivos afetam de forma positiva a redução de *stock*, custos, permitindo aumentar a competitividade e produtividade, assim como no tempo de resposta à procura e no tempo de entrega (Maresova *et al.*, 2018; Tissir *et al.*, 2020; Valamede & Akkari, 2020; Sinha & Roy, 2020).

Pode-se salientar que a combinação entre a FL e a I4.0 contribuirá para um maior desempenho operacional, bem como o surgimento de tecnologias, modelos de negócio, novos produtos e serviços, pelo que o efeito de uma nova revolução industrial no desenvolvimento da economia seria enorme. A produção iniciar-se-á a partir da procura, para assim, evitar desperdícios, uma utilização mais eficiente dos recursos, assim como permitirá uma melhor economia nas empresas (Naciri *et al.*, 2022; Pereira & Sachidananda, 2022).

Deste modo, é de salientar que toda a mudança num sistema produtivo não depende exclusivamente das tecnologias aliadas à I4.0 ou mesmo do uso de equipamentos modernos com tecnologias. Mas sim, é possível afirmar que a mudança depende da natureza do trabalho do sistema produtivo, que requererá colaboradores mais bem capacitados e com a exigência de diferentes competências de modo que os investimentos realizados sejam transformados em lucros. Também é importante salientar que o fator humano sempre será um ponto-chave em qualquer processo produtivo (Naciri *et al.*, 2022; Pereira & Sachidananda, 2022).

4.5. Interação entre a Indústria 4.0 e a Manutenção

Face às constantes alterações do mercado e grande competitividade entre empresas, estas têm procurado mudar os seus processos de fabrico de modo a fazerem face aos novos desafios que enfrentam atualmente. Deste modo a I4.0 é vista como a principal impulsionadora para que as empresas consigam competir a nível global (Silvestri *et al.*, 2020; Zonta *et al.*, 2020).

Uma das áreas que contribui para o bom funcionamento dos processos de fabrico é a manutenção. Assim, a par da revolução industrial, esta também tem vindo a evoluir significativamente dentro das empresas, já que esta assume um papel de garantia do funcionamento dos equipamentos e instalações quer em condições normais como em situações condicionadas, quer seja por motivos técnicos e/ou económicos. Assim a manutenção deve garantir o bom funcionamento quer das instalações e equipamentos para o qual foram projetados, contribuindo para a melhoria e aumento da produção, como a qualidade desta (Silvestri *et al.*, 2020; Zonta *et al.*, 2020).

A quarta revolução industrial traz um novo paradigma para as indústrias, e no que se refere ao setor da manutenção traz também novos desafios bem como novas atribuições para facilitar os controlos e acessos remotos, automação dos processos e dispositivos. Assim, de modo a satisfazer as necessidades da empresa do futuro, os conceitos associados à manutenção deverão ser cada vez mais refinados e explorados (Korchagin *et al.*, 2022).

Antes do surgimento da I4.0 as intervenções da manutenção eram basicamente de cariz preventivo e corretivo. A manutenção preventiva, tinha como função assegurar a disponibilidade e fiabilidade dos sistemas baseando-se para tal no histórico de manutenção dos mesmos. Mesmo assim, este tipo de manutenção por vezes leva a ações de manutenção desnecessárias como é o caso de substituição de componentes que se encontram em bom estado, fazendo com que os custos associados à manutenção aumentem. Por outro lado, quando se realiza uma manutenção corretiva ocorre paragem não planeada que por vezes faz parar toda a cadeia produtiva o que aumenta os custos associados à produção e manutenção (Aceto *et al.*, 2019; Poór *et al.*, 2019).

Com o surgimento da I4.0 surge outra estratégia de manutenção e que nos dias de hoje tem-se tornando crucial: a manutenção preditiva, como alternativa à forma tradicional de como manutenção faz a gestão dos seus ativos. Esta nova alternativa, possibilita ter ativos físicos inteligentes, o que permite ter conhecimento e registo do histórico de

falhas, reparações e custos, tornando o planeamento da manutenção mais preciso e efetivo. O planeamento e controlo da manutenção é uma das atividades de gestão que tem como objetivo estruturar a gestão da manutenção, avaliar e implementar um novo sistema de informação, ou criar novos módulos no *Enterprise Resource Planning* (ERP) existente para promover a integração com os restantes departamentos da empresa, de forma a tornar a produção mais eficiente, reduzindo os equipamentos inativos e melhorando a qualidade do produto (Nawaiseh *et al.*, 2022).

Atualmente surge o termo “*e-maintenance*” que é um sistema inteligente que pode ser definido como uma tecnologia de manutenção preditiva baseada na internet e *Web-enabled* que consiste na avaliação inteligente da degradação da máquina, e-prognóstico e e-diagnóstico de modo a permitir ter condições de quase zero avarias. A avaliação remota e em tempo real da informação relativa ao desempenho da máquina requer a integração de diversas tecnologias, incluindo sensores, agentes de avaliação, entre outros. Dependendo da forma com que a *e-maintenance* se relaciona com a manutenção esta pode ser considerada de diversas formas, quer seja suporte à manutenção, plano de manutenção, estratégia de manutenção, etc. (Muller *et al.*, 2008; Tee *et al.*, 2019).

A *e-maintenance* traz consigo inúmeros benefícios e pode trazer oportunidades de desenvolvimento de novos tipos e estratégias de manutenção que fazem parte do desenvolvimento da quarta revolução industrial (Muller *et al.*, 2008; Tee *et al.*, 2019).

A seguir são enumeradas e descritas as potenciais melhorias que a manutenção associada à I4.0 podem trazer (Silvestri *et al.*, 2020; Shaheen & Németh, 2022):

Manutenção remota – qualquer operador, gestor, técnico, especialista e gerente tem a possibilidade de aceder remotamente a um equipamento na fábrica através da internet. Os utilizadores podem aceder em qualquer lado e com qualquer tipo de dispositivo desde que este tenha ligação à internet e um navegador. Consequentemente, com a execução de ações remotas os operadores podem configurar, controlar, detetar e corrigir erros, etc. Assim os serviços prestados pelos técnicos do fabricante que apoiam no chão de fábrica podem ser reduzidos pois existe facilidade de diagnosticar problemas quando o erro ocorre e, depois, melhorar a manutenção preventiva graças à monitorização do desempenho da máquina. Este tipo de manutenção ao permitir realizar ações remotas, reduz a necessidade da presença de um técnico no local (Iung & Márquez, 2008; Paluch, 2014; Masoni *et al.*, 2017).

Manutenção cooperativa ou colaborativa – esta manutenção simboliza a oportunidade de implementar uma plataforma de informação que faça a conexão de subsistemas e os vários parceiros da empresa geograficamente dispersos através de redes de internet existentes, permitindo assim uma conexão entre diferentes áreas da empresa, diferentes empresas por meio de diferentes utilizadores. Como resultado da automatização do acesso de dados e informação, pode-se ter acesso a diversos dados de falhas para tornar os produtos mais fiáveis e duradouros podendo assim trazer como resultado melhorias na manutenção destes, já que os fabricantes dos equipamentos graças à conexão poderão dispor de dados procedentes dos seus equipamentos instalados em diversos locais e sob diversas características de utilização (Liu *et al.*, 2010; Qiu *et al.*, 2014; Sipsas *et al.*, 2016).

Manutenção imediata *on-line* – a monitorização remota em tempo real do estado dos equipamentos juntamente com alertas programáveis permite ao responsável pela manutenção responder rapidamente a qualquer situação. Deste modo, permite aos operadores prepararem uma intervenção bem planeada e melhorada. As principais aplicações da *e-maintenance* incluem a formulação de políticas de decisão para a calendarização da manutenção em tempo real baseada em dados atualizados sobre o histórico de intervenções do equipamento, estado de fluxo de produção, dependências funcionais, entre outros (Levrat *et al.*, 2008; Jantunen *et al.*, 2011).

Manutenção Preditiva – este tipo de manutenção é mais recente, possibilita a previsão de falhas para otimizar os esforços de manutenção. A I4.0 tem uma forte influência na indústria, uma das vertentes deste desenvolvimento pode ser definida como a combinação de máquinas e equipamentos inteligentes, processos, dando origem a uma rede de unidades de produção, virtualizando o mundo real num grande sistema de informação centralizado (Li *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2019; Bousdekis *et al.*, 2019; Kamat & Sugandhi, 2020).

A manutenção preditiva permite garantir uma qualidade de serviço desejada, através de sistemas de monitorização, indicando as condições reais durante o funcionamento das máquinas e equipamentos, com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação através de sistemas de comunicação *wireless* com o intuito de prevenir avarias inesperadas (Li *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2019; Bousdekis *et al.*, 2019; Kamat & Sugandhi, 2020).

A melhoria da utilização dos ativos da fábrica dá-se através da combinação de ferramentas e técnicas de manutenção preditiva, sendo esta uma das maiores áreas de

interesse do *e-maintenance*, pois proporciona às empresas ferramentas de previsão dotadas de inteligência, que monitoriza os seus ativos quer sejam equipamentos, produtos, processos, para assim minimizar o tempo de inatividade do sistema, equilibrando o risco de falha com os lucros possíveis de alcançar (Li *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2019; Bousdekis *et al.*, 2019; Kamat & Sugandhi, 2020).

Capítulo 5

Modelos de Integração da Manutenção, Filosofia *Lean* e Indústria 4.0: Revisão Sistemática da Literatura²

No presente capítulo realiza-se uma revisão sistemática da literatura sobre os conceitos: Manutenção, Filosofia *Lean* e Indústria 4.0, onde se apresenta o enquadramento, assim como a metodologia de pesquisa e a análise da revisão sistemática da literatura. Ainda neste capítulo são analisados os modelos existentes que integram os três conceitos de interesse para o desenvolvimento da presente tese.

5.1. Enquadramento

A globalização marcou a evolução dos métodos de produção artesanal para os processos produtivos mecanizados, tornando o mercado cada vez mais competitivo, levando a uma mudança drástica nas empresas. As organizações buscam cada vez mais metodologias que possam proporcionar um aumento da produtividade e redução de custos para enfrentar o atual cenário. As exigências do mercado atual obrigam os responsáveis pela manutenção a procurar novas abordagens para alcançar elevados níveis de eficácia e eficiência. Assim, uma manutenção eficiente constitui uma vantagem competitiva em relação às empresas concorrentes (Mehmeti *et al.*, 2018; Poór *et al.*, 2019).

Neste contexto, surge como resposta o conceito de FL, que visa reduzir desperdícios, melhorar o processo produtivo, diminuir tempo e custo de produção. Esta filosofia, por sua vez, pode ser aplicada em diversas áreas, inclusive na área da manutenção. Esta área é vital para qualquer empresa, onde se pretende que os equipamentos operem sem interrupções e com uma produção de qualidade. Algumas das ferramentas da FL aplicadas na gestão da manutenção podem contribuir para a melhoria das atividades de manutenção causando impactos positivos no funcionamento geral das empresas (Mouzani & Bouami, 2019; Cordeiro, 2019).

² A RSL resultou no artigo: Mendes, D. S. F. T., Navas, H. V. G., & Charrua-Santos, F. M. B. (2021). Relationship between maintenance, lean philosophy, and Industry 4.0: Systematic Literature Review. *In European Professors of Industrial Engineering and Management*, 54, 54-59.

Por sua vez, a indústria está em constante mudança e, conseqüentemente, os processos produtivos são cada vez mais complexos e mais variáveis, exigindo uma evolução neste setor. Esta mudança traz consigo novas abordagens, ligadas à evolução dos avanços tecnológicos, orientados para a digitalização dos processos de produção. A quarta revolução industrial ou I4.0, trouxe consigo vários desafios sociais e económicos para as empresas em geral. A I4.0 é a combinação dos processos físicos de produção com os de informação e de comunicação proporcionados por tecnologias que funcionam por meio de sistemas integrados, sensores e dispositivos móveis capazes de se comunicarem entre si pela internet (Santos *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2021). Estas mudanças trazem consigo um novo paradigma para obrigar as empresas a reverem as suas políticas e estratégias internas para se tornarem mais rápidas e ágeis e adaptadas a um mundo em constante mudança onde a concorrência é cada vez mais complexa e competitiva (Passath & Mertens, 2019).

5.2. Metodologia de Pesquisa

O método de pesquisa escolhido para a realização deste estudo foi a revisão sistemática da literatura (RSL), por ser um método explícito e sistemático, voltado para a identificação, avaliação e síntese de trabalhos científicos (Tranfield *et al.*, 2003).

Em pesquisas anteriores verificou-se que o interesse pela combinação dos tópicos: Manutenção, *Lean* e Indústria 4.0 tem aumentado nos últimos anos, porém a literatura mostra-se emergente no que diz respeito à interação dos respetivos tópicos, seja na combinação Manutenção, *Lean* e Indústria 4.0 (MLI4.0), combinados entre pares: *Lean* e Indústria 4.0 (LI4.0), Manutenção *Lean* (ML), Manutenção Indústria 4.0 (MI4.0).

Assim, como base para a investigação, as principais questões de investigação deste estudo são:

- a) Como tem evoluído o interesse por estes temas?
- b) Quais são as indústrias mais envolvidas nesta área?
- c) Quais são as ferramentas mais utilizadas quando se combinam os temas: ML, MI4.0, LI4.0 e MLI4.0?
- d) Que tipo de estudo é realizado?

Desta forma foram definidas três bases de dados eletrônicas para pesquisa: *Google Scholar*, *B-On* e *Science Direct*. Os estudos relevantes foram pesquisados nas bases de dados referidas usando as seguintes palavras-chave: *Maintenance 4.0*, *Smart Maintenance*, *Lean Maintenance*, *Maintenance Lean Techniques*, *Lean Industry 4.0*, *Lean 4.0*, *Lean Smart Maintenance* e *Lean Maintenance 4.0*.

O critério de inclusão inclui trabalhos publicados em revistas, congressos de acesso aberto, entre 2015 e 2021, nos seguintes idiomas: inglês, português e castelhano que estejam relacionados aos temas em questão. Também são excluídas Revisões bibliográficas, publicações repetidas, estudos publicados fora do tema e determinadas bases de dados eletrônicas.

Na pesquisa inicial, etapa 0, foram identificados 1696 artigos. A seguir, na etapa 1, procede-se à leitura dos títulos dos artigos previamente selecionados para verificação de sua importância. Na etapa 2, foram lidos os títulos, resumos e palavras-chave. Por fim, na etapa 3, dos 438 artigos restantes, 68 foram aceitos e incluídos como estudos principais para a pesquisa. Os demais trabalhos foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão ou pelo tema principal da pesquisa.

5.3. Análise da Revisão Sistemática de Literatura

Nesta fase foram apresentados a análise e os resultados da RSL. A intenção é aprofundar os dados extraídos e responder às questões formuladas anteriormente. Assim, após a seleção dos artigos, foi criada uma tabela para cada uma das combinações referidas com a seguinte informação: Autor, ano, setor, relação, ferramentas *Lean*, técnicas da I4.0, modelo, estudo de caso e benefícios (Anexo A1).

Relativamente à questão **a)** de modo geral, os resultados indicam que a interação entre ML, MI4.0, LI4.0 e MLI4.0 tem despertado interesse e atenção por parte da comunidade de pesquisa, podendo-se notar que 26,7% dos artigos são do ano de 2020, 19,3% de 2019, 14,8% de 2018. Quanto ao tipo de indústria a aplicar os conceitos alvo de estudo na presente tese **b)** foi possível verificar que existe uma grande variedade de indústrias que implementam parcial ou totalmente as ferramentas e/ou tecnologias associadas aos conceitos em estudo. Após análise, identificou-se que a indústria automóvel representa 14,7%, a indústria aeronáutica 7,4%, a indústria do plástico 5,9% e o setor energético 5,9%, estando o restante repartido por várias outras áreas industriais. No que concerne às ferramentas mais utilizadas **c)** quando se combinam os temas ML são: 5S 12,5%, TPM 10,7%, SMED 8,9%, VSM 7,1%, *Kaizen* 5,4%, *Kanban*

5,4%. Relativamente às ferramentas utilizadas quando integrada a MI4.0 são: *Predictive Maintenance* 11,6%, *Sensors* 10,1%, *Big Data* 8,7%, *IoT* 8,7%, *Cloud Computing* 4,3%, *Augmented Reality* 4,3%. Por outro lado, quando a integração envolve o LI4.0 são: *Lean tool / principles* 10,3%, *I4.0 principles / techniques* 7,4%, *IoT* 5,9%, *CPS* 5,9%, *Cloud Computing* 4,4%. Por último, as ferramentas utilizadas quando se relaciona os três conceitos de investigação são: *Lean Smart Maintenance* 40,0 %, *Lean tools* 20,0%, *Artificial Intelligence* 20,0%, *Lean Smart Maintenance Maturity Model* 20,0%. Quanto ao tipo de estudo realizado **d)**, ao longo dos anos tem variado, porém nesta pesquisa, constatou-se que 55,9% dos artigos estão na conceção de um modelo com a aplicação de um estudo de caso, 30,9% estudo de caso e 13, 2% concentra-se no desenvolvimento de modelos.

5.4. Análise dos Modelos Existentes que Integram a Manutenção, Filosofia *Lean* e a Indústria 4.0

Através da RSL foi possível identificar uma grande variedade de trabalhos científicos que abordam arquiteturas de melhoria contínua da gestão da manutenção. Deste modo, para a construção do sistema, e após análise de vários artigos científicos publicados foram escolhidos 31 modelos. Na tabela 5.1 são apresentados 26 artigos que foram analisados tendo em conta o tipo de indústria, interação dos conceitos, ferramentas da FL utilizadas, Tecnologias da I4.0, Tipo de estudo levado a cabo (Modelo ou Estudo de caso), e por último os benefícios apresentados.

Tabela 5.1 – Tabela resumo das 26 publicações analisadas.

Autor(es) e ano	Indústria	Interação conceitos	Ferramentas FL	Tecnologias I4.0	Tipo de desenvolvimento		Benefícios
					Modelo	Estudo de caso	
Spenhoff <i>et al.</i> , 2022	Indústria de transportes e logística	FLI4.0	<i>Heijunka Every Product Every Cycle 4.0 (EPEC 4.0)</i>	CPS	x	x	Operar o sistema de produção da forma mais eficiente e flexível possível.
Mayr <i>et al.</i> , 2018	Indústria elétrica/eletrônica	MFLI4.0	TPM	<i>Cloud computing Condition monitoring (CM) Sensors Graphical user interface (GUI)</i>	x	x	Visa a perfeição em todas as atividades diárias. Integração de colaboradores. Monitorização de equipamentos.
Ghouat <i>et al.</i> , 2021	-	FLI4.0		<i>Cyber Physical Production Systems (CPPS) Big Data</i>	x		Análise de dados em tempo real. Melhoria na tomada de decisões e capacidade de resposta do sistema.
Deuse <i>et al.</i> , 2020	-	FLI4.0	GaProSys 4.0	Estrutura conjunta do <i>Lean</i> e I4.0	x		Boa ligação entre <i>Lean</i> e I4.0. Ajudar as empresas na avaliação e seleção de abordagens dependendo da estrutura da empresa
Phuong & Guidat, 2018	Indústria têxtil	FLI4.0	VSM	RFID		x	Visualização de potenciais problemas em tempo real, quantidade produzida, número de paragens na linha, entre outras.
Rifqi <i>et al.</i> , 2020	Empresa de Gestão e Manutenção de Instalações	FLI4.0	<i>Kaizen</i>	IoT CMMS		x	Redução da taxa de reclamações. Melhoria do desempenho operacional, social e económico.
Itani <i>et al.</i> , 2020	Empresa de fabrico de janelas	FLI4.0	<i>Decision-Making Tool</i> (e. g. JIT, VSM, TPM, SMED)	<i>Simulation</i>	x	x	Aumento da produtividade. Redução do número de colaboradores nos processos, tempo de espera e tempo consumidos por atividades sem valor acrescentado. Permite-lhe determinar o melhor cenário de alocação de recursos para aumentar a produtividade.

Tabela 5.2 – Tabela resumo das 26 publicações analisadas (cont.).

Autor(es) e ano	Indústria	Interação conceitos	Ferramentas FL	Tecnologias I4.0	Tipo de desenvolvimento		Benefícios
					Modelo	Estudo de caso	
Kolberg <i>et al.</i> , 2017	-	FLI4.0	<i>Kanban</i>	CPS ICT	x		Melhoria do processo de produção. Produtos altamente personalizados.
Ramadan & Salah, 2019	Indústria elétrica/eletrónica	FLI4.0	5S <i>Standard Work</i> <i>Poka-Yoke</i> <i>DynamicVSM</i>	RFID <i>Information and Communication Technologies (ICT)</i>	x	x	Recolha de dados em tempo real. Controlo de produção. Redução de resíduos.
Ma <i>et al.</i> , 2017	Indústria automóvel	FLI4.0	<i>Jidoka</i>	CPS <i>Internet</i> IoT <i>Cloud Computing</i> <i>Function Block (FB)</i>	x	x	Melhoria considerável do desempenho produtivo a nível global. Controladores mais descentralizados. Redução de custos.
Frontoni <i>et al.</i> , 2020	Indústria de transporte marítimo	FLI4.0	<i>Lean principles</i>	RFID		x	Redução do tempo de chumbo e redução de custos, com um nível mais elevado de segurança dos bens e uma política de partilha de dados em tempo real.
Ferreira <i>et al.</i> , 2019	Indústria (madeira)	FLI4.0	<i>iLeanDMAIC</i> SMED VSM		x	x	Ajuda a resolver os problemas de forma fácil e precisa. Redução do tempo necessário para mudar a máquina.
Kostoláni <i>et al.</i> , 2019	Indústria automóvel	MI4.0		<i>Augmented reality (AR),</i> <i>Internet of Things (IoT),</i> <i>Big Data, E-maintenance,</i> <i>Cloud computing,</i> <i>Condition monitor (CM)</i>	x	x	Aumento da produtividade, eficiência e qualidade dos processos. Tempo de inatividade devido a uma avaria inesperada do equipamento diminuiu significativamente.
Paolanti <i>et al.</i> , 2018	Máquina de corte	MI4.0		<i>Predictive Maintenance,</i> <i>Sensors, Programmable</i> <i>logic controller</i>	x	x	Previsão do estado da máquina com alta precisão. Melhor desempenho do sistema.
Koenig <i>et al.</i> , 2019	Indústria aeronáutica	MI4.0		<i>Internet of Things (IoT),</i> <i>Cloud computing,</i> <i>Wireless data</i> <i>transmission, Sensors</i>		x	Monitorização eficaz. Detecção de falhas na fase inicial. Melhoria do desempenho da manutenção.

Tabela 5.3 – Tabela resumo das 26 publicações analisadas (cont.).

Autor(es) e ano	Indústria	Interação conceitos	Ferramentas FL	Tecnologias I4.0	Tipo de desenvolvimento		Benefícios
					Modelo	Estudo de caso	
Bumblauskas <i>et al.</i> , 2017	Disjuntores elétricos	MI4.0		<i>Smart maintenance decision support system (SMDSS), Predictive Maintenance, Big Data, Analytical hierarchy process (AHP)</i>	x	x	Melhoria do ciclo de vida dos ativos. Redução de custos. Estabelecimento de planos de manutenção e monitorização remota.
Lewandowski & Olszewska, 2020	Indústria automóvel	MI4.0		<i>Automated task scheduling system</i>	x	x	Tempo de manutenção reduzido. Melhoria da qualidade de manutenção. Prioriza e seleciona tarefas.
Ceruti <i>et al.</i> , 2019	Indústria aeronáutica	MI4.0		<i>Additive manufacturing (AM), Augmented reality (AR)</i>		2	Melhor desempenho e flexibilidade de manutenção. Facilidade de aprendizagem e manutenção. Redução de erros nos processos.
Konstantinidis <i>et al.</i> , 2020	Indústria automóvel	MI4.0		<i>Mobile augmented reality maintenance assistance (MARMA), Augmented reality (AR), Computer Vision (CV)</i>	x	x	Apoio no desenvolvimento de técnicos de manutenção. Permite a visualização de instruções detalhadas.
Arrascue-Hernandez <i>et al.</i> , 2020	Indústria têxtil	MFL	5 S VSM Ishikawa SMED Hierarchical Analytical Process (HAP) TPM (Autonomous maintenance)		x	x	Permitiu melhorar a linha de produção, reduzindo o tempo de entrega das encomendas e o tempo de entrega. Aumento das vendas.
Meddaoui, 2018	Indústria automóvel	MFL	TPM OEE		x	x	Melhoria de desempenho dos seus processos operacionais e OEE. Redução de custos.

Tabela 5.4 – Tabela resumo das 26 publicações analisadas (cont.).

Autor(es) e ano	Indústria	Interação conceitos	Ferramentas FL	Tecnologias I4.0	Tipo de desenvolvimento		Benefícios
					Modelo	Estudo de caso	
Epler <i>et al.</i> , 2017	-	MFL	<i>Technical Systems for Especial Purposes (TSSP)</i> 5S <i>Visual system Kanban</i> <i>Technical systems maintenance (TSM) Layout</i>		x		Redução do tempo de ciclo de manutenção. Melhoria da gestão de intervenção e manutenção. Aumento da eficiência e eficácia.
Ramakrishnan & Nallusamy, 2017	Indústria (de transformação)	MFL	TPM <i>Kaizen</i> <i>Standard Work</i>			x	Redução do tempo de inatividade e tempo de execução. Melhoria do desempenho da manutenção.
Wenchi <i>et al.</i> , 2015	Indústria de Gás Natural Liquefeito	MFL	VSM <i>Kanban</i>			x	Melhoria da eficiência dos processos produtivos. Identificação de atividades que não acrescentem valor e desperdício no processo. Redução do tempo de chumbo e tempo total do ciclo.
Lacerda <i>et al.</i> , 2016	Indústria automóvel	MFL	<i>Value Stream Mapping (VSM), Kaizen, Single Minute Exchange of Die (SMED)</i>			x	O tempo de ciclo no subprocesso de montagem, o número de operadores, os resíduos e o nível de existência foram reduzidos e um dos principais estrangulamentos foi eliminado.
Pombal <i>et al.</i> , 2019	Gestão de oficinas de manutenção	MFL	<i>5S, Kanban, Visual management, Mizusumashi</i>			x	Redução de resíduos, no tempo necessário para localizar e repor material consumível. Melhor controlo de inventário e gestão de <i>workshops</i> .

Os restantes 5 artigos foram escolhidos para uma análise mais detalhada, tendo em conta vários critérios como: melhoria dos processos produtivos e na tomada de decisão, monitorização dos equipamentos, melhoria contínua dos processos, melhoria da intervenção da manutenção, manutenção inteligente e flexibilidade de aplicabilidade dos modelos. A seguir são descritos de forma resumida os modelos escolhidos.

Magadán *et al.* (2020) desenvolveram um sistema *low-cost* de monitorização de motores elétricos em tempo real. O sistema será a base para a deteção de anomalias operacionais e um futuro sistema de manutenção preditiva. De modo que o sistema não tenha um custo elevado, este foi desenvolvido com componentes de *hardware* e *software* de baixo custo, como módulos multisensores e *gateway*, *software* de código aberto e uma versão gratuita de um serviço de análise da IoT (Magadán *et al.*, 2020).

O funcionamento do sistema de modo geral, é feito por meio de sensores acoplados nos motores a monitorizar. O *gateway* por sua vez envia os dados recolhidos pelos sensores para a *Cloud*, onde será possível o armazenamento, tratamento e visualização dos dados por meio do ThingSpeak, com recurso a um computador (Magadán *et al.*, 2020).

O sistema apresentado por Magadán *et al.* (2020) é composto por três camadas. A primeira camada é composta por sensores IoT, que permitem a recolha de toda a informação desejada. Nesta camada é também realizada a filtragem, agregação e transformação de dados. Esta camada é constituída por um módulo multisensor de baixo custo, SensorTag CC2650, da Texas Instruments, incluindo sensores de movimento (MPU9250) e humidade (HDC1000). Também tem um acelerómetro, um magnetómetro e um giroscópio, medindo vibrações com frequência de 1 KHz. O módulo suporta comunicação sem fio por meio de *Bluetooth*. A segunda camada é formada por *gateways*, que têm como função recolher os dados dos vários sensores e fazer a ligação com a última camada. Os elementos que constituem a segunda camada são os *gateways*, computador de bordo Raspberry Pi 3 Model B+, que tem 1 GB de RAM, bem como entradas para conectar uma câmara e um *touchscreen*. A última camada, é onde todos os dados relevantes são armazenados, analisados e visualizados por meio de um sistema de armazenamento e um serviço de análise da IoT. As duas primeiras camadas ajudam a distribuir o processamento da informação entre os sensores e a *Cloud*, melhorando a velocidade e reduzindo a quantidade de dados a transferir (Magadán *et al.*, 2020).

Apesar do sistema permitir a recolha de informações sobre as vibrações do motor elétrico, estas não são suficientes. Assim é necessário utilizar o *Fast Fourier*

Transformation (FFT) sobre as acelerações medidas no motor. O FFT foi calculado no módulo multisensor e no *gateway*. Os módulos multisensores e *gateways* comunicam-se entre si por meio de *Bluetooth*, que é usado para transmitir pequenos pacotes de dados recolhidos pelos sensores. De modo a conectar com a última camada os *gateways* transferem os dados para a última camada (Magadán *et al.*, 2020).

O sistema proposto por Magadán *et al.* (2020) envolve os conceitos Manutenção e I4.0, é um sistema de fácil implementação e económico no ambiente industrial. Apesar de ser um sistema atrativo em termos económicos, este ainda precisa de ser mais desenvolvido para que seja mais completo, pois necessita da criação de um sistema de deteção automática de anomalias, a rotulação de todos os dados recebidos e armazenados na nuvem, bem como o desenvolvimento de um modelo preditivo para estimar a probabilidade de falha do motor, ajudando na redução dos custos de manutenção.

Ashjaei & Bengtsson (2017) desenvolveram um sistema composto por duas camadas para melhorar a gestão da manutenção inteligente. A primeira camada é composta pelos recursos físicos: máquinas e equipamentos, e restantes componentes que apoiam o funcionamento do chão de fábrica, sala de monitorização e por dispositivos de armazenamento de dados e processamento, que tem como função fazer a conexão e filtragem dos dados recolhidos da fábrica, máquinas e equipamentos para segunda camada. A segunda e última camada, Camada em nuvem, é composta por uma unidade de processamento e armazenamento de dados. A comunicação entre as duas camadas é possível pela rede local, no entanto, o sistema pode suportar dados vindos do exterior pela rede de longa distância também existente no sistema. O funcionamento do sistema consiste na recolha de dados por meio de sensores que estão acoplados aos recursos físicos. Após a recolha dos dados e o seu devido tratamento, estes são enviados para a sala de monitorização, bem como para os dispositivos móveis, que permitem fazer o acompanhamento em tempo real do estado dos recursos físicos. A rede local, tal como a rede de longa de distância, permitem o controlo e a monitorização a cada instante, e caso o sistema detete uma anomalia, este emite um aviso. O sistema desenvolvido pelos autores permite ultrapassar problemas tais como a velocidade e segurança dos dados. Este sistema permite a monitorização da vibração podendo ainda ser introduzida no sistema algumas ações como por exemplo: o aumento e diminuição da velocidade de rotação de forma remota, contribuindo assim para a redução da vibração. Para além da rede local, este possibilita a interação com elementos externos pela rede de longa distância trazendo mais vantagens na comunicação entre vários dispositivos internos e externos (Ashjaei & Bengtsson, 2017).

Kinz *et al.* (2016) desenvolveram o modelo *Lean Smart Maintenance* (LSM). Este modelo pretende melhorar a eficácia e eficiência da gestão de ativos, assim como uma melhoria de recursos e riscos. A parte inteligente representa a perspetiva de eficácia, LSM, esta proporciona uma gestão de manutenção inteligente com o foco na melhoria permanente. A parte *Lean* é a perspetiva de eficiência da abordagem LSM. O principal objetivo desta filosofia é a redução de perdas na entrada dos sistemas de gestão da manutenção, com uma orientação a recursos sustentáveis. O modelo apresentado pelos autores foi implementado na indústria metalúrgica, mais concretamente num laminador de aço (Kinz *et al.*, 2016).

Para a correta implementação do modelo proposto por Kinz *et al.* (2016), inicialmente, deve ser realizada uma avaliação e classificação dos ativos. Estes são avaliados, por meio de uma ferramenta de avaliação estruturada, podendo ser identificados os ativos críticos de um sistema de produção. Esta é uma fase importante no processo de identificação da estratégia da manutenção, já que ajuda a concentrar recursos limitados em ativos críticos. A avaliação é realizada por uma equipa composta por especialistas de manutenção e operadores que tenham experiência com os ativos do chão de fábrica, com recurso à metodologia FMEA. Todo o processo deve ser documentado, pois apoiará o conhecimento da gestão na manutenção de acordo com o pretendido com o LSM. Após a avaliação e classificação dos ativos com recurso ao MATLAB procede-se ao agrupamento dos riscos por meio do algoritmo *K-means*. Com a avaliação, classificação e a análise de riscos feita, é efetuada a escolha dos ativos para reajustar as atividades de manutenção. Após todo este processo, procede-se à monitorização dos ativos que foram escolhidos previamente (Kinz *et al.*, 2016).

O modelo proposto por Kinz *et al.* (2016) e após a sua implementação no caso de estudo permitiu identificar várias oportunidades de melhoria. A avaliação de risco, forneceu uma base importante para as decisões de gestão de ativos estratégicos. A adaptação da estratégia de manutenção, por meio da FL, reduziu vários riscos sem fazer investimentos de elevada dimensão. A I4.0 ajuda a desenvolver um modelo de prognóstico de avarias (Kinz *et al.*, 2016).

Apesar do modelo LSM abordar os três conceitos, Manutenção, FL e I4.0 como é pretendido, este não é de todo específico em todas as fases da implementação do mesmo. Na fase da monitorização dos ativos não está descrita como foi implementada nem que componentes de *hardware*, *software* foram utilizados, surgindo dúvidas do modo como foi realizada a monitorização dos ativos escolhidos. Outra limitação, é o facto de o modelo proposto ter sido só implementado num tipo de indústria que é

caracterizada por ter ativos de elevados custos e o sistema produtivo em cadeia, também este com altos custos de falha, não sabendo se este sistema é replicável numa empresa de pequena ou média dimensão. Para além das limitações descritas a avaliação de risco é um processo demorado, e mesmo com a criação de uma ferramenta de avaliação de critérios, não foi possível avaliar todos os objetivos importantes.

Shahin *et al.* (2020) desenvolveram um sistema de suporte de decisão *Kanban Estimated Actual Total (Kanban EAT)* baseado em nuvem para demonstrar a integração de uma tecnologia da Indústria 4.0 (computação em nuvem) e uma ferramenta *Lean* (Shahin *et al.*, 2020).

O *Kanban* tem algumas limitações no que concerne a uma visão corporativa de gestão de recursos. Deste modo, os autores desenvolveram um sistema que fornece uma visão holística da gestão de operações, usando a tecnologia em nuvem que proporciona a I4.0. Este sistema auxilia na tomada de decisão, combinado com uma metodologia robusta de melhoria contínua, podendo contribuir para melhorar a tomada de decisão. O sistema proposto é desenvolvido e implementado numa empresa genérica de gestão de operações de serviços, utilizando uma plataforma em nuvem (Shahin *et al.*, 2020).

A estrutura proposta consiste em seis elementos fundamentais que podem ser ligados e desligados, ampliados a partir de qualquer navegador moderno. Os seis elementos incluem uma chave de licença do sistema, que determina o tamanho e escala do mesmo (Plano de Serviço). A base de dados, que contém dados relevantes da produção. Um servidor baseado em nuvem, que possui todas as páginas da *web* e itens (Servidor de aplicação). Um sistema de autenticação de utilizador, para que estes possam aceder por meio das credenciais ao *e-mail* da empresa. A interface do utilizador contém o menu principal e submenus que podem ser acedidos por vários utilizadores, onde também podem ser contemplados as regras necessárias para a entrada de dados, bem como relatórios (Shahin *et al.*, 2020). Para a correta implementação do sistema os autores salientam que este deve ser realizado em 5 etapas. A primeira etapa é construir o valor total estimado do trabalho e as atividades individuais a realizar. A segunda etapa é estabelecer um cronograma. A terceira etapa é uma simulação do sistema de suporte à decisão. A quarta etapa consiste em reunir as quantidades reais de produção. As horas de trabalho utilizadas, o número de produtos de má qualidade e as horas de produção perdidas devido ao tempo de inatividade. A quinta e última etapa é exibir o progresso do trabalho e de cada atividade com base no sistema *Kanban EAT* que pode ser visto por meio de vários dispositivos que tenham acesso à internet (Shahin *et al.*, 2020).

O sistema desenvolvido por Shahin *et al.* (2020) aborda dois dos três dos conceitos: FL e I4.0, não abordando o conceito de Manutenção. Este permite ter um controlo real e constante do sistema produtivo, quer seja na quantidade produzida real, horas de trabalho utilizadas, número de itens com má qualidade, assim como o número de paragens da linha. O sistema proposto contribui para melhorar o sistema produtivo e obter indicadores importantes do mesmo, permitindo ter uma melhor tomada de decisão. Embora o sistema esteja descrito, este não está detalhadamente, faltando uma descrição mais pormenorizada quer dos constituintes necessários para compor o sistema (*hardware* e *software*), bem como as fases de implementação.

Islas *et al.* (2019) desenvolveram um protótipo para realizar a monitorização contínua da condição dos fornos de fundição de Alumínio. A fundição é um processo que permite que o Alumínio derretido seja transformado em produtos. Deste modo, o Alumínio deve estar a temperatura constante, tornando o forno num elemento importante neste processo e o controlo da temperatura torna-se fundamental. O protótipo permite monitorizar os fornos para que estes operem a temperaturas que oscilam entre os 600°C e 620°C (Islas *et al.*, 2019). O sistema de monitorização proposto usa a tecnologia XBee para construir uma rede de sensores sem fio. O controlador da rede irá enviar os dados recolhidas dos fornos para uma rede local por meio da internet. A rede de sensores sem fios é responsável pela medição da corrente elétrica do forno e pelo envio para o coordenador. O coordenador é o gestor da rede e receberá os dados enviados pelos sensores e identifica a origem de cada dado, que por sua vez exibirá na rede da empresa por meio de um servidor *Web* inserido no Arduino Mega. Graças à Internet das coisas o departamento de manutenção pode ser alertado por *e-mail* da existência de qualquer anomalia existente em cada um dos fornos. Também é possível armazenar os dados obtidos na nuvem, para tal utiliza-se um Raspberry Pi (Islas *et al.*, 2019). Os elementos necessários para a implementação do protótipo proposto por Islas *et al.*, (2019) são: o *software* X-CTU, e os componentes: módulos Xbee Pro S2B, Raspberry Pi, uma fonte de alimentação e um transformador, a rede local, IoT e uma *Dashboard* (Islas *et al.*, 2019).

O protótipo que Islas *et al.* (2019) desenvolveram apesar de este ter sido projetado para monitorizar a temperatura dos fornos revelou-se importante para melhorar o desempenho da manutenção. Este sistema pode ser melhorado pela versatilidade e ser aplicado em diferentes domínios e em diferentes parâmetros a monitorizar, contudo não aborda o conceito da FL.

Embora os modelos selecionados e analisados anteriormente abordem alguns dos conceitos de interesse para o presente estudo e tenham algumas semelhanças como a monitorização em tempo real da condição dos recursos físicos, estes apresentam algumas vantagens e limitações.

Kinz *et al.* (2016) abordam todos os conceitos, contudo este modelo é mais complexo que os restantes. O sistema proposto por Shahin *et al.* (2020) envolve os conceitos da FL e I4.0 e não contempla o conceito da manutenção. Os sistemas propostos por Ashjaei & Bengtsson (2017), Magadán *et al.* (2019), e Islas *et al.* (2019) tem por base a I4.0 e a Manutenção não interagindo a FL, que possibilitaria obter um melhor desempenho e melhoria contínua quer do sistema produtivo como no departamento da Manutenção.

Os modelos acima analisados apresentaram algumas limitações semelhantes como distância máxima entre os vários dispositivos que compõem o sistema, pois quanto maior a distância entre estes, menor será a quantidade de dados recolhidos. Outra limitação, tem a ver com a quantidade de dados a recolher e analisar, sendo o que está por de trás deste problema para além da quantidade de dados a recolher é a complexidade dos mesmos. Embora um dos sistemas propostos tenha em consideração melhorar a segurança do sistema, os sistemas analisados têm ainda algumas lacunas neste sentido.

5.5. Nota Conclusiva

Este capítulo foi de extrema relevância, pois foi realizado uma RSL sobre os conceitos: Manutenção, FL e I4.0, tendo em conta as questões de investigação: Como tem evoluído o interesse por estes temas?; Quais são as indústrias mais envolvidas nesta área?; Quais são as ferramentas mais utilizadas quando se combinam os temas: ML, MI4.0, LI4.0 e MLI4.0?; Que tipo de estudo é realizado?

Relativamente à questão a), de modo geral, os resultados indicam que tem havido um maior interesse por parte dos investigadores, académicos e indústria em geral relativamente ao estudo da interação entre ML, MI4.0, LI4.0 e MLI4.0, sendo que o ano de 2020 foi o que teve maior produção científica (26,7%). Também se verificou que as indústrias mais envolvidas nesta área são: indústria automóvel (14,7%), a indústria aeronáutica (7,4%), a indústria do plástico (5,9%) e o setor energético (5,9%). c) Em relação às 3 ferramentas mais utilizadas quando se combinam os temas ML são: 5S 12,5%, TPM 10,7% e SMED 8,9%. Relativamente às 3 ferramentas mais utilizadas

quando se integra a MI4.0 são: *Predictive Maintenance* 11,6%, *Sensors* 10,1% e *Big Data* 8,7%. Por outro lado, quando a integração envolve o LI4.0, as 3 ferramentas mais utilizadas são: *Lean tool / principles* 10,3%, *I4.0 principles / techniques* 7,4% e *IoT* 5,9%. Por último, as 3 ferramentas mais utilizadas quando se relaciona os três conceitos de investigação são: *Lean Smart Maintenance* 40,0 %, *Lean tools* 20,0% e *Artificial Intelligence* 20,0%. Quanto ao tipo de estudo realizado d) 5,9% dos artigos estão na conceção de um modelo com a aplicação de um estudo de caso, 30,9% estudo de caso e 13,2% concentra-se no desenvolvimento de modelos.

Após a identificação de 68 publicações por meio da RSL, foram escolhidos 31 modelos de acordo com o foco principal da presente tese, para uma análise mais detalhada. Destes 31 modelos, 26 foram classificados tendo em conta as investigações por tipo de indústria, interação dos conceitos, ferramentas da FL utilizadas, tecnologias da I4.0, tipo de estudo levado a cabo (Modelo ou Estudo de caso), e por último os benefícios apresentados.

Os restantes 5 artigos foram escolhidos para uma análise mais aprofundada, tendo em conta vários critérios como: melhoria dos processos produtivos e na tomada de decisão, monitorização dos equipamentos, melhoria contínua dos processos, melhoria da intervenção da manutenção, manutenção inteligente e flexibilidade de aplicabilidade dos modelos. Estes artigos serviram de ponto de partida para o desenvolvimento da presente tese.

Kinz *et al.* (2016) desenvolveram o modelo *Lean Smart Maintenance* (LSM). Este modelo pretende melhorar a eficácia e eficiência da gestão de ativos, assim como uma melhoria de recursos e riscos.

Ashjaei & Bengtsson (2017) desenvolveram um sistema composto por duas camadas para melhorar a gestão da manutenção inteligente. O funcionamento do sistema consiste na recolha de dados por meio de sensores que estão acoplados aos recursos físicos. Após a recolha dos dados e o seu devido tratamento, estes são enviados para a sala de monitorização, bem como para os dispositivos móveis, que permitem fazer o acompanhamento em tempo real do estado dos recursos físicos. A rede local, como a rede de longa distância, permitem o controlo e a monitorização a cada instante, e caso o sistema detete uma anomalia, este emite um aviso.

Islas *et al.* (2019) desenvolveram um protótipo para realizar a monitorização contínua da condição dos fornos de fundição de alumínio. A fundição é um processo que permite

que o alumínio derretido seja transformado em produtos. Deste modo, o alumínio deve estar a temperatura constante, tornando o forno num elemento importante neste processo e o controlo da temperatura torna-se fundamental. O protótipo permite monitorizar os fornos para que estes operem a temperaturas que oscilam entre os 600 °C e 620 °C.

Magadán *et al.* (2020) desenvolveram um sistema de baixo custo para a monitorização de motores elétricos em tempo real. O sistema será a base para a deteção de anomalias operacionais e um futuro sistema de manutenção preditiva. Este foi desenvolvido com componentes de *hardware* e *software* de baixo custo, como módulos multisensores e *gateway*, *software* de código aberto e uma versão gratuita de um serviço de análise da IoT.

Shahin *et al.* (2020) desenvolveram um sistema de suporte de decisão *Kanban Estimated Actual Total* (Kanban EAT) baseado em nuvem para demonstrar a integração de uma das tecnologias da I4.0 (computação em nuvem) e uma ferramenta *Lean*.

Os 5 modelos analisados apresentam algumas limitações semelhantes, como a distância máxima entre os vários dispositivos que compõem o sistema. A quantidade e complexidade de dados a recolher, assim como a segurança associada aos modelos analisados. A análise destes modelos serviu para delinear as especificações do modelo de melhoria da gestão da manutenção através da Filosofia *Lean* e a I4.0 proposto no capítulo seguinte.

Capítulo 6

Proposta de um Modelo de Melhoria da Gestão da Manutenção Através da Filosofia *Lean* e a Indústria 4.0

No presente capítulo é proposto um modelo para melhorar a Gestão da Manutenção através da Filosofia *Lean* e a Indústria 4.0. Neste capítulo é apresentada a descrição e esquematização do respetivo modelo, bem como descritos todos os componentes constituintes do mesmo. Também é apresentada a metodologia *Total Productive Maintenance*, bem como as suas fases de implementação de modo a ser agregada ao modelo proposto.

6.1. Descrição do Modelo Proposto

Ao longo do desenvolvimento da presente investigação foi possível evidenciar a existência de várias arquiteturas para melhorar a gestão da manutenção. Alguns destes modelos, analisados anteriormente, ou outros que podem ser contemplados no Apêndice A combinam os conceitos de interesse para a realização da presente tese. Quando se integram os três conceitos, os modelos são na sua maioria de maior complexidade no que diz respeito à sua implementação. Nas restantes arquiteturas analisadas, onde não são abordados os três conceitos, mas sim a combinação de dois conceitos, foi possível destacar vários pela simplicidade do sistema e flexibilidade de aplicação. O sistema apresentado tem por base a arquitetura recentemente proposta por Magadán *et al.* (2020), assim como em outros sistemas apresentados anteriormente, de forma a adequar-se e enquadrar-se da melhor forma aos objetivos delineados.

Para a conceção do modelo, definiu-se que teria por base a I4.0, pela capacidade que este conceito fornece na monitorização em tempo real das máquinas e equipamentos, o que possibilita a recolha com precisão de parâmetros de elevada importância que com a sua análise contribuirá para uma melhor tomada de decisão, quer no sistema produtivo bem como no planeamento ou intervenção da manutenção, o que fará melhorar

consideravelmente o desempenho produtivo da empresa, trazendo consigo uma melhor gestão e utilização dos recursos utilizados.

A I4.0 traz consigo significativas vantagens para as empresas e o setor da manutenção não é exceção, já que estas novas contribuições facilitam os controlos e acessos remotos, assim como a automação dos processos e dispositivos. O incremento das tecnologias que a I4.0, proporciona uma melhor recolha e análise de dados importantes como tempos de paragens, tempo de ciclo, tempo de reparação, entre outros, trazendo consigo vários benefícios como a redução dos tempos de paragens não programadas, melhoria no fluxo de produção de forma contínua, redução de riscos, entre outros benefícios (Ashjaei & Bengtsson, 2017; Islas *et al.*, 2019; Magadán *et al.*, 2020).

De modo a beneficiar das vantagens que a I4.0 proporciona e melhorar os vários sistemas analisados anteriormente e em particular o sistema desenvolvido por Magadán *et al.* (2020), introduziu-se a FL. Esta filosofia possibilitará juntamente com a I4.0 obter uma melhoria contínua quer no sistema produtivo como no departamento da manutenção. A introdução da FL na manutenção vem contribuir para melhorar significativamente o departamento da manutenção, sendo este departamento fundamental em qualquer empresa.

O sistema foi desenvolvido para que a sua implementação ocorra apenas numa parte da empresa, e neste caso será aplicado ao chão de fábrica, assim como no departamento da manutenção. Este, para além de ser de fácil aplicação, é composto por elementos de baixo custo, tornando-o num sistema de monitorização de máquinas e equipamentos versátil, económico e que pode ser utilizado em qualquer contexto empresarial.

Na figura 6.1 está representado o sistema inicialmente proposto³, que é composto por uma arquitetura a implementar para assegurar a monitorização de forma contínua e precisa dos indicadores mais relevantes da manutenção e dos processos produtivos como a disponibilidade intrínseca e operacional, Tempo médio de reparação ou *Mean Time To Repair* (MTTR), Tempo médio entre falhas ou *Mean Time Between Failures*

³ Resultou no artigo: Mendes, D. S., Navas, H. V., Didelet, F., & Charrua-Santos, F. (2022). Improvement of maintenance management through Lean Philosophy and Industry 4.0. *Maintenance, Reliability and Condition Monitoring*, 2(1), 17-27. <https://doi.org/10.21595/marc.2022.22472>

(MTBF), Tempo de ciclo e Eficiência global do equipamento. A par da arquitetura a implementar, o sistema carece da implementação da Manutenção Autônoma (MA)⁴.

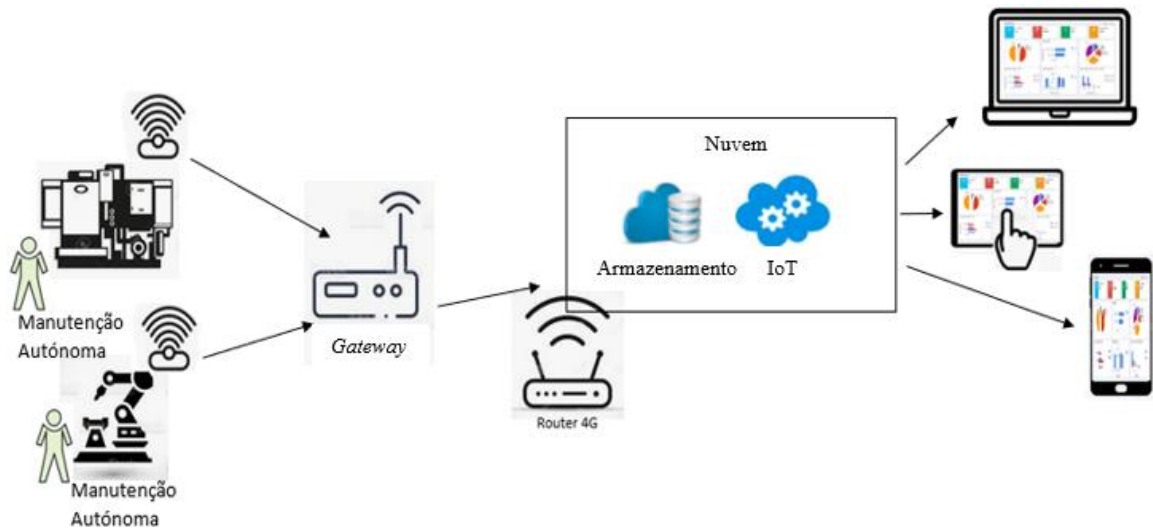


Figura 6.1 – Arquitetura proposta para a melhoria contínua das atividades da gestão da manutenção.

O sistema de monitorização é apoiado pela rede local de internet (sem fios) e o protocolo de comunicação *Bluetooth Low Energy* (BLE) e vários dispositivos que permitem a recolha dos dados, armazenamento e visualização dos mesmos por meio de dispositivos móveis ou fixos. A monitorização é realizada por meio de um sensor sem fios que recolhe e transmite os dados para um *gateway*, que tem como objetivo receber os dados de todos os sensores existentes no chão de fábrica para monitorizar os equipamentos. O *gateway* processa os dados recebidos e após o processamento dos mesmos envia para o servidor situado na *cloud*. Este tem como objetivo armazenar toda a informação e ser a interface para visualização dos dados em tempo real, por meio dos vários dispositivos. Por último, a camada nuvem, é implementada com recurso a uma versão gratuita do ThingSpeak, um serviço de plataforma da IoT que permite agregação, visualização e análise de fluxos de dados em tempo real na *cloud*.

A eficiência do chão de fábrica depende de vários fatores, sendo um dos mais importantes manter as máquinas e equipamentos de forma que estes funcionem sem qualquer tipo de problemas, paragens inesperadas ou estarem a produzir fora dos parâmetros provocando perdas produtivas comprometendo todo o sistema produtivo.

⁴ Após o desenvolvimento do sistema inicialmente proposto, iniciou-se a sua implementação ao qual resultou no artigo: Mendes, D. S., Navas, H. V., & Charrua-Santos, F. M. (2023). Improving the performance of a conveyor belt through lean philosophy and Industry 4.0. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2022-0055>

Para além da monitorização em tempo real que permite ter a perceção do que está a ocorrer em cada momento e em cada máquina e equipamento do chão de fábrica a MA vem contribuir para melhorar o processo produtivo, fomentar a melhoria contínua e facilitar diretamente o trabalho dos técnicos de manutenção. Pois de forma diária, os operadores através da correta limpeza, inspeções conseguem detetar pequenos defeitos, corrigi-los ou avisar de forma precoce os responsáveis da manutenção de modo que estes possam ter uma intervenção célere e assertiva evitando um problema de maior tamanho e complexidade.

A MA é um dos oito pilares do TPM (Figura 2.4), sendo o patamar mais elevado desta metodologia no que concerne à manutenção. Apesar da MA ser um dos pilares do TPM, esta pode ser implementada sem a necessidade da implementação dos restantes pilares que constituem o TPM, pois esta partilha alguns pontos idênticos, sendo que o TPM é uma metodologia mais completa. A utilização quer da metodologia TPM de forma completa ou exclusivamente do pilar MA depende de vários fatores quer sejam estes humanos, financeiros e temporais.

Por meio da MA, os operadores através das várias formações e treinos, adquirem novos conhecimentos, que com o constante treino e a realização das tarefas do dia-a-dia, possibilita que estes possam realizar tarefas que outrora não faziam. Estas tarefas incluem manter o equipamento limpo, lubrificado e com os componentes todos devidamente fixados de modo a diminuir a deterioração e prevenir falhas dos equipamentos. Para alcançar os objetivos da MA, é necessário o envolvimento de todos os colaboradores da área da manutenção como da produção, nas atividades do dia a dia para manter o estado do equipamento, ou bem como para dar formação para melhorar as habilidades do operador, e participação do pessoal de produção no processo de manutenção (da Silva *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2019; Joochim & Meekaew, 2019).

Assim, o objetivo fundamental da MA é evitar no dia-a-dia da produção, a deterioração dos equipamentos detetando e tratando suas anomalias num estágio inicial antes que estas se desenvolvam e resultem em falhas de maior gravidade (da Silva *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2019; Joochim & Meekaew, 2019).

O operador torna-se o elemento-chave, pois é este quem irá ter a responsabilidade de realizar pequenas atividades de manutenção (limpeza, aperto de parafusos e lubrificação). O operador tendo esta postura sentir-se-á como mais um elemento importante o que ajudará no seu desenvolvimento e gosto pelo posto de trabalho. Também ajuda a criar mais tempo para a equipa de manutenção, ficando esta com mais

tempo para tarefas morosas e complexas, assim como fazer melhorias nas máquinas contribuindo para o aumento da produtividade (da Silva *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2019; Joochim & Meekaew, 2019).

Com este processo pretende-se diminuir a frequência das avarias devido a pequenas causas que podem ser identificadas e resolvidas pelos operadores dos equipamentos sendo estes autônomos para a elaboração da manutenção nos próprios equipamentos (da Silva *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2019; Joochim & Meekaew, 2019).

Assim, a MA consiste em treinar e capacitar os operadores para desenvolverem o sentimento de propriedade sobre os equipamentos e assim zelar pelos mesmos, realizando inspeções e detetando problemas em fase inicial, e até mesmo realizar pequenos ajustes e apertos com o objetivo de manter o equipamento em perfeitas condições o máximo de tempo possível (da Silva *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2019; Joochim & Meekaew, 2019).

Um equipamento bem mantido, em boas condições de limpeza, reparações com as frequências ótimas, operadores treinados e qualificados, terá uma maior produtividade.

Para a implementação da MA deve-se seguir sete passos: Limpeza inicial, Eliminar fontes de problemas, Estabelecer padrões de limpeza e lubrificação, Inspeção geral, Inspeção autônoma, Organização e arrumação e por último Manutenção autônoma total. Para além destes passos, deve-se constituir uma equipa na qual irá acompanhar todo este processo, no treino e formação dos operadores e avaliação como mostra a Figura 6.2. Seguidamente são descritos os 7 passos sucintamente (da Silva *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2019; Joochim & Meekaew, 2019):

Passo 1 – Limpeza inicial: neste primeiro passo os operadores limpam e inspecionam as máquinas e equipamentos com o objetivo de resolver possíveis problemas num curto prazo.

Passo 2 – Eliminar fontes de problemas: este passo corresponde a efetuar modificações tanto no equipamento como no posto de trabalho, de modo a assegurar a prevenção da sujidade, reduzindo ao máximo o tempo gasto nessas ações. Neste passo os locais de difícil acesso devem ser eliminados, com o objetivo de facilitar os serviços de operação e manutenção.

Passo 3 – Estabelecer padrões de limpeza e lubrificação: proceder à construção de normas de limpeza de forma a melhorar o tempo de operação de ações como limpezas e

verificações. Também possui o objetivo de padronizar essas normas, para que este procedimento seja o mesmo em outras empresas pertencentes à mesma organização.

Passo 4 – Inspeção geral: neste passo os operadores devem ser treinados em manutenções básicas nas máquinas e equipamentos no qual lidam no seu dia-a-dia. Detetar eventuais falhas nas máquinas e equipamentos, através da aplicação de procedimentos técnicos de inspeção geral, conforme o manual de inspeção do equipamento.

Passo 5 – Inspeção autónoma: uma vez dominada a inspeção geral, a seguir será fornecida informação necessária quer seja procedimentos de inspeção, manuais de trabalho entre outros, para se fazer uma inspeção periódica e ajustamentos. Neste passo os operadores já devem se sentir capazes de distinguir se o equipamento está a operar corretamente e tomar ações caso se verifique alguma anomalia.

Passo 6 – Organização e arrumação: os operadores devem organizar o seu posto de trabalho, começando por definir os pontos de inspeção obrigatórios no equipamento, organizar as ferramentas e materiais essenciais ao posto de trabalho, nas quantidades estritamente necessárias e por último definir os padrões de trabalho e responsabilidades.

Passo 7 – Manutenção autónoma total: é o último passo da MA, e por isso neste passo os colaboradores envolvidos já devem ser capazes de gerir autonomamente as suas atividades. Assim, neste passo pretende-se que sejam registados todos os dados sobre o equipamento para posterior análise que pode auxiliar na definição de novos parâmetros para a melhoria da fiabilidade, manutibilidade e operacionalidade do equipamento (Filho *et al.*, 2019; da Silva *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2019; Joochim & Meekaew, 2019).

À medida que se prepara e implementa a MA como mostra a figura 6.2, o operador começa a adquirir conhecimento. Na fase inicial de preparação, este começa a adquirir conhecimentos da MA, os objetivos da mesma, bem como conhecimentos sobre os equipamentos e manutenção básica. Na fase de implementação que contempla os passos 1 a 7, o operador começa a entender e enraizar o conceito de melhoria contínua (passo 1 e 2). No passo 3 e 4, o operador continua a adquirir mais conhecimento sobre as características e funcionamento do equipamento. No passo 5 e 6, o operador pelo treino e partilha do conhecimento que teve ao longo do tempo, começa a ter uma melhor perceção entre precisão do equipamento e qualidade do produto. Por último, no

passo 7, o operador começa a ter um maior controlo e conhecimento sobre os equipamentos que terá de operar no seu posto de trabalho, possibilitando a este realizar pequenas reparações nos equipamentos, bem como identificar e resolver problemas que possam ocorrer no dia-a-dia (da Silva *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2019; Joochim & Meekaew, 2019).

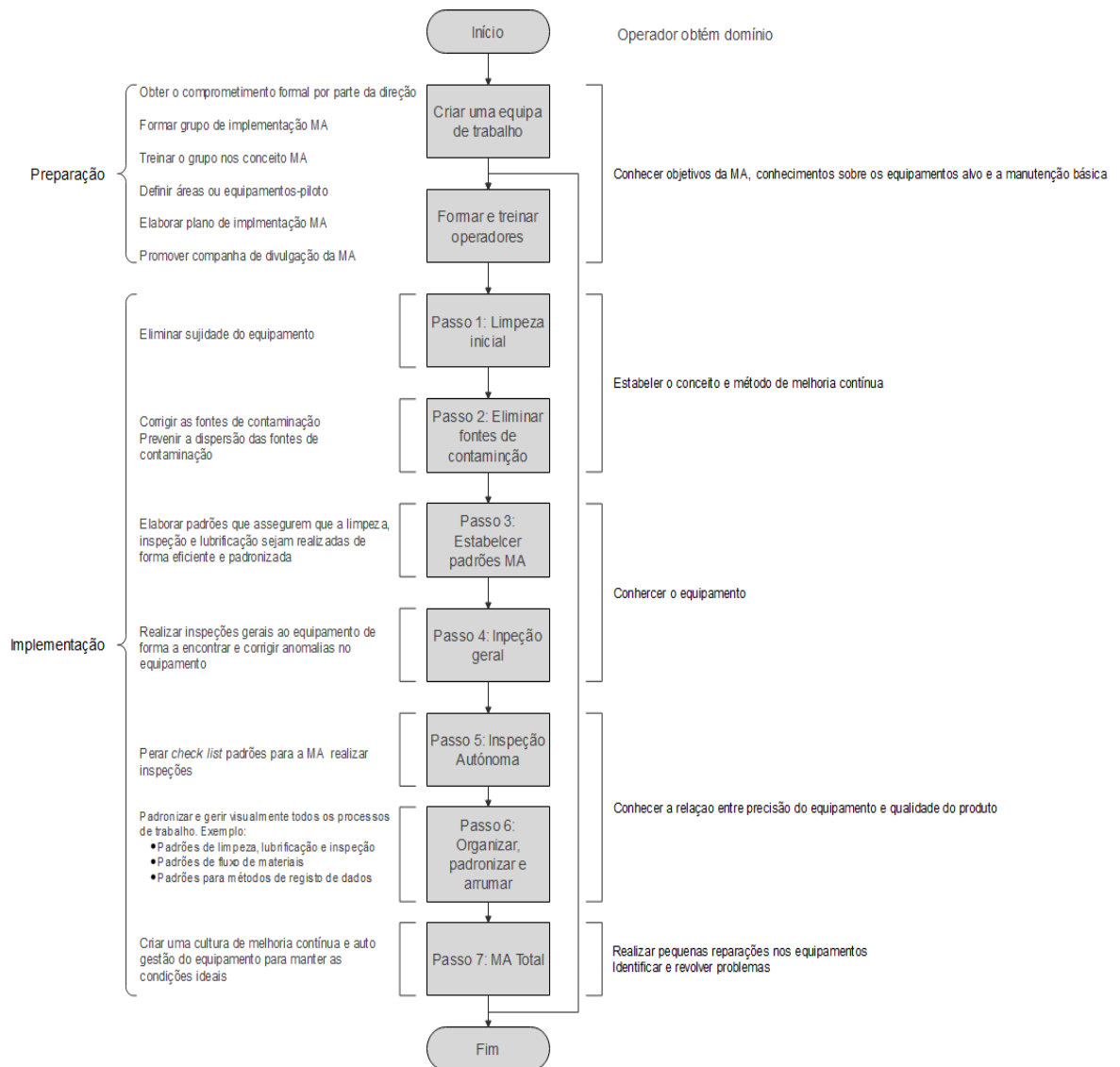


Figura 6.2 – Implementação da MA.

O sistema anterior, ao longo do desenvolvimento da tese, foi tendo algumas adaptações até chegar ao apresentado na figura 6.3. Este modelo, é uma adaptação e melhoria dos sistemas apresentados anteriormente, de forma a adequar-se e enquadrar-se melhor forma aos objetivos, assim como de tornar o mesmo mais abrangente possível.

Na figura 6.3 é possível observar o sistema proposto já na sua versão final⁵. Este, é composto por três camadas que permitiram após a sua implementação assegurar a monitorização de forma contínua e precisa dos indicadores mais relevantes da manutenção e dos processos produtivos como a disponibilidade intrínseca e operacional, Tempo médio de reparação, Tempo médio entre falhas, Tempo de ciclo e Eficiência global do equipamento. A primeira camada é composta pelos recursos físicos: máquinas e equipamentos, sensores, e pelos operadores e técnicos de manutenção que recebem alertas e dados em tempo real. A segunda camada, comunicação, permite fazer a conexão entre as várias camadas e os dispositivos de visualização móveis ou fixos. A terceira camada, nuvem, é composta por um serviço da plataforma IoT e o sistema de armazenamento e processamento de dados. A par da arquitetura a implementar, o sistema carece da implementação da *Total Productive Maintenance* (TPM).

Também é de salientar que a metodologia proposta teve como base a gestão da manutenção, os seus indicadores, e que este possa também fornecer dados relevantes para melhorar a gestão dos processos produtivos.

Assim, o modelo apresenta flexibilidade de aplicação e pode ser facilmente adaptado de forma a poder monitorizar de forma contínua e em tempo real vários outros parâmetros como a vibração e ruído, temperatura, entre outros.

⁵ Resultou no artigo: Mendes, D., Gaspar, P. D., Charrua-Santos, F., & Navas, H. (2023). Synergies between Lean and Industry 4.0 for Enhanced Maintenance Management in Sustainable Operations: A Model Proposal. *Processes*, 11(9), 2691. <https://doi.org/10.3390/pr11092691>

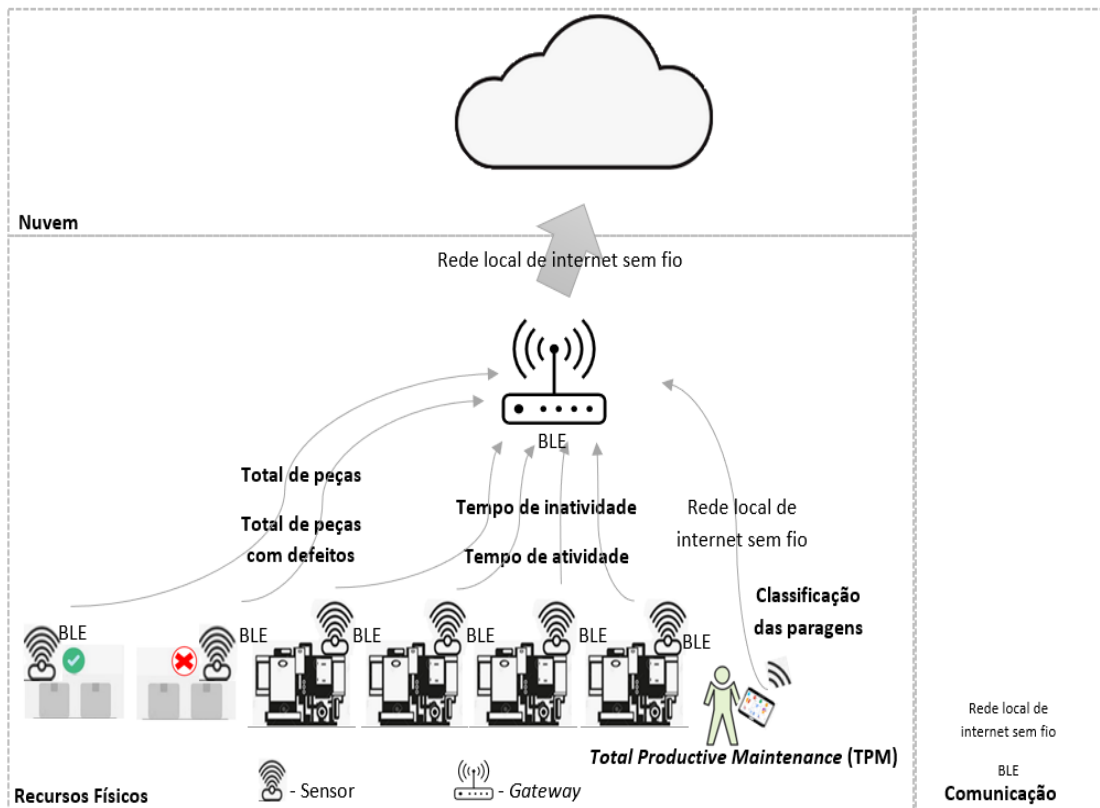


Figura 6.3 – Proposta do modelo de aplicação que combina os conceitos de Manutenção, Filosofia *Lean* e Indústria 4.0.

6.2. Funcionamento do Modelo Proposto e sua Monitorização

O sistema de monitorização que compõe o modelo é apoiado pela rede de internet local sem fio e pelos vários dispositivos que possibilitam a recolha de forma contínua e em tempo real dos dados, o seu armazenamento e visualização dos mesmos através de dispositivos fixos ou móveis que tenham acesso à internet.

De modo a possibilitar a comunicação entre os diferentes componentes que compõem o sistema, é possível encontrar várias soluções como o *Wi-Fi*, *Global System for Mobile* (GSM) ou *Bluetooth Low Energy* (BLE). Para realizar a comunicação entre os componentes do sistema foi escolhido a tecnologia BLE, que é uma tecnologia de comunicação sem fios. O BLE permite reduzir os consumos de energia em dispositivos que não precisaram de transmitir grandes volumes de dados, consumindo muito menos energia, quando comparado com o *Bluetooth* clássico sendo uma opção em aplicações que tenham capacidade de energia limitada.

A monitorização das máquinas e equipamentos, bem como o total de peças produzidas com ou sem defeitos é realizada por meio de sensores sem fios que recolhem e transmitem os dados para o *gateway* (Figura 6.4). Caso ocorra uma paragem, o operador com recurso a um *tablet*, *smartphone* ou um dispositivo ligado à internet classifica o tipo de paragem. A classificação da paragem é efetuada acedendo à plataforma de internet (ThingSpeak), a qual possibilita não só a inserção da classificação das paragens, mas também a visualização de todos os indicadores associados à máquina ou de outros dados relevantes na gestão da manutenção como do processo produtivo.

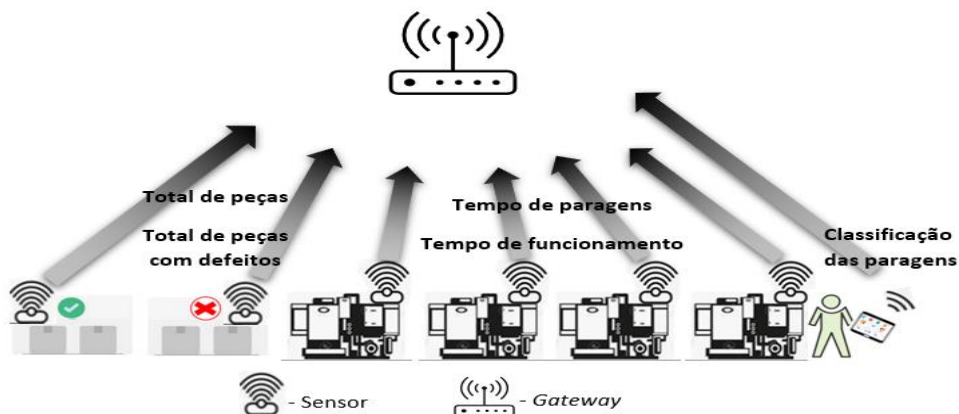


Figura 6.4 – Monitorização de tempo de paragens, tempo de funcionamento, total de peças com e sem defeitos.

O *gateway* por sua vez, tem como objetivo receber os dados de todos os sensores existentes no chão de fábrica como mostra a figura 6.5. Este processa os dados enviados pelos sensores e após o processamento dos mesmos, envia para o servidor situado na nuvem.



Figura 6.5 – Interface do *Gateway* com a camada Nuvem.

Na última camada, o processador armazena toda a informação e faz de interface para a visualização dos dados em tempo real com recurso a uma versão gratuita do

ThingSpeak, um serviço de plataforma da IoT que permite agregação, análise de fluxo de dados e visualização em tempo real, por meio dos vários dispositivos existentes no chão de fábrica como computadores, *tablets*, *dashboards*, *touchscreens*, *smartphones*, entre outros dispositivos. Através da figura 6.6 pode-se observar de forma resumida e esquemática a descrição do funcionamento do sistema de monitorização proposto, a restante parte da descrição do funcionamento do modelo (A) é apresentada no subcapítulo 6.4.1.

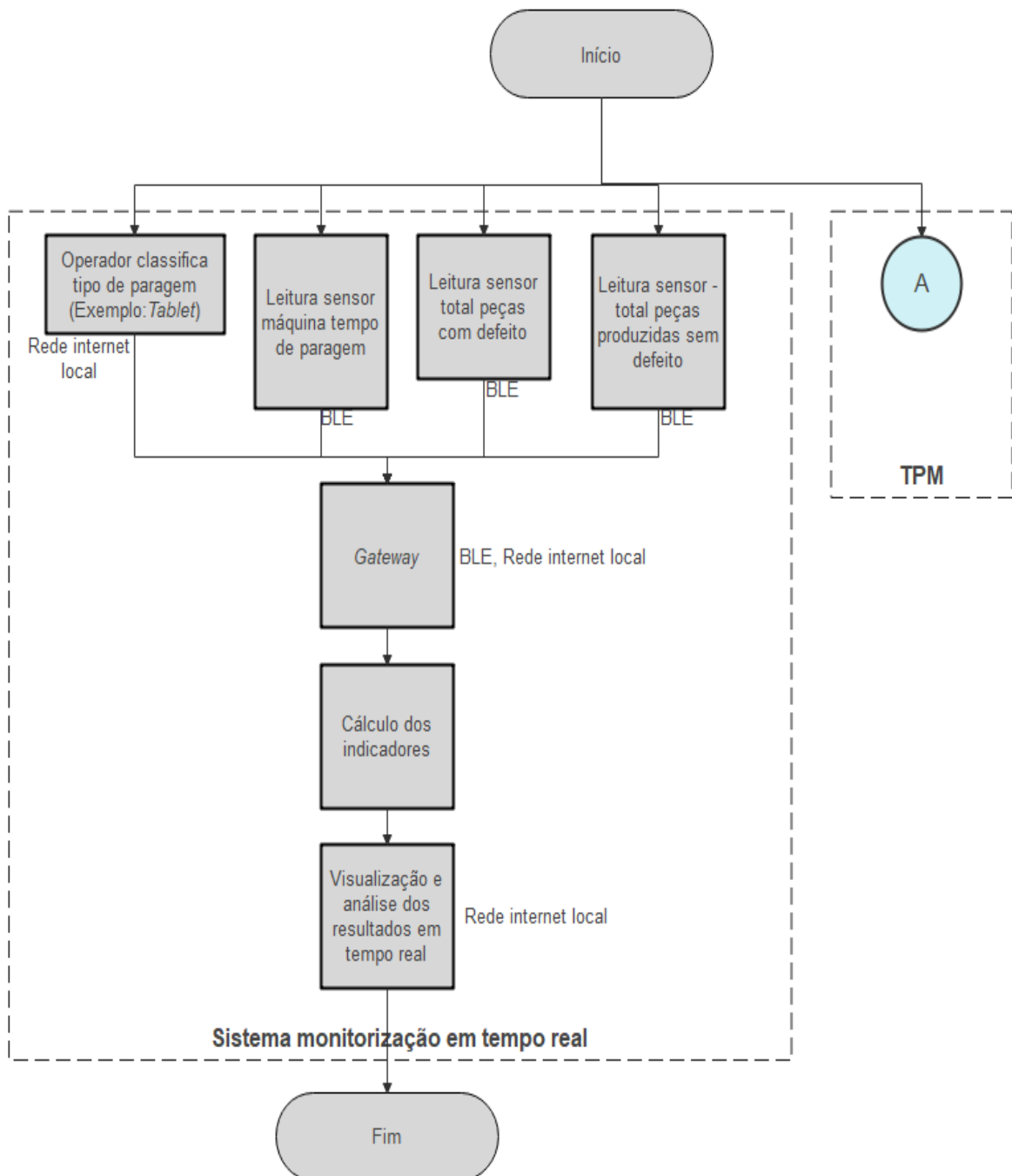


Figura 6.6 – Fluxograma da descrição do funcionamento do sistema.

6.3. Componentes do Sistema de Monitorização

Os sensores são os componentes encarregados de recolher e transmitir os dados ao *gateway*. Os sensores escolhidos foram: April USB Beacon 306 e o módulo sensor infravermelho TCRT5000. O sensor April USB Beacon 306 BLE alimentado por USB, baseado em nRF52820, com uma antena externa tem um alcance máximo de 100 metros e permite a comunicação entre dispositivos por meio de BLE, este tem como função assegurar monitorização das máquinas e equipamentos. O módulo sensor infravermelho TCRT5000 tem a função de contador de modo a ser possível determinar o número de peças bem produzidas e/ou com defeitos (se aplicável). Este sensor de módulo ótico deteta obstáculos com alta precisão e permite detetar um objeto a uma distância até 12 milímetros, possui módulo de saída: digital e analógica.

Contudo, para que seja possível fazer esta contabilização o sensor TCRT5000 tem de estar conectado ao microcontrolador, Arduino Nano 33 BLE, que permite a comunicação com o *gateway*. O Arduino Nano 33 BLE permite realizar a ligação entre dispositivos a curta distância por meio do protocolo BLE, velocidade 64 MHz, memória *flash* 1 MB (nRF52840), SRAM de 256 KB, 8 pinos de entrada analógica.

O *gateway* tem como função receber os sinais emitidos pelos sensores que estão constantemente em interação com o mesmo. O dispositivo escolhido tem necessariamente de ter a capacidade de receber sinais BLE e neste caso foi escolhido o Raspberry Pi 3 Model B+. Este tem a capacidade de 1GB de RAM, 1 porta HDMI e 4 portas USB 2.0, onde também permite a conexão com uma câmara e um *touchscreen*. As taxas de *Ethernet* até 100 Mbps. O dispositivo permite também a comunicação através de *Wi-fi*, BLE.

Por último, na camada nuvem, com recurso à versão gratuita que a IoT disponibiliza o ThingSpeak, no qual permite a agregação, visualização e análise de fluxos de dados em tempo real na nuvem. Este serviço fornece visualizações instantâneas de dados enviados pelos *gateways* do sistema e também pode executar análise e processamento de fluxo de dados *online* por meio da rede local de internet. A arquitetura de comunicação utilizada (Figura 6.7) possibilita a interação entre os vários dispositivos e protocolos de comunicação utilizados.

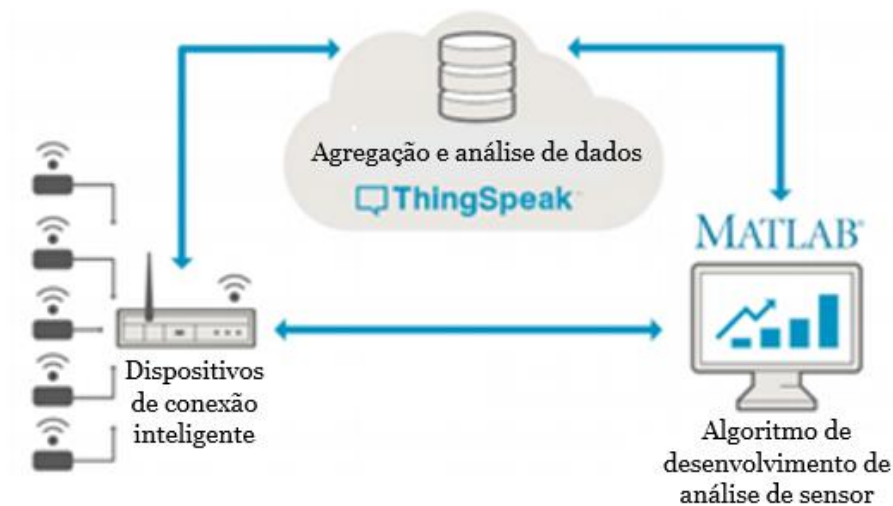


Figura 6.7 – Arquitetura de comunicação de dispositivos com o ThingSpeak.

6.4. Introdução da *Total Productive Maintenance* no Modelo Proposto

O TPM é uma metodologia que envolve a participação de todas as áreas e hierarquias da empresa. Esta, permite alcançar a melhoria contínua das máquinas e equipamentos, eliminando falhas, bem como as suas causas de falha. Promove a MA realizada pelos vários colaboradores do chão de fábrica, que proporciona um aumento da produtividade conseguida quer seja pela maior disponibilidade dos ativos, assim como de uma melhoria da qualidade dos produtos produzidos. Esta metodologia, é baseada em oito pilares (figura 2.4) que suportam o desenvolvimento do TPM e que cada um destes serão desenvolvidos no estudo de caso.

6.4.1 Implementação do TPM

A implementação do TPM, embora a sua introdução no seio das empresas seja da responsabilidade da gestão de topo, envolve a participação global de todos os colaboradores da empresa. Esta, deve ser feita com rigor, planeamento e preparação pois são a chave de um bom sucesso. A implementação, de modo geral, é feita em quatro fases e 12 etapas que dão suporte às atividades básicas de desenvolvimento, que constituem os requisitos mínimos para o desenvolvimento do TPM (Anexo B.1).

Para que a metodologia possa ser bem implementada e obter sucesso, assim como melhorar o funcionamento das máquinas e equipamentos e dos operadores, devem ser criadas condições para que se possa eliminar as seis grandes perdas sendo estas: falha/avaria do equipamento, configurações e ajustes, esperas ou micro paragens,

perdas de velocidade, defeitos de qualidade e retrabalho e arranque e mudanças de produtos, que levam à melhoria do funcionamento do sistema produtivo, bem como ajuda no aumento da competência e motivação dos operadores.

A primeira fase, designada como preparatória, tem uma duração média de três a seis meses, consiste na preparação do ambiente da empresa, para a receção e introdução do TPM. Nesta fase é delineado um plano introdutório para a sua aplicação (Anexo B.1).

A segunda fase, Introdução, deve-se alargar a divulgação da implementação aos *stakeholders*, para ficarem a par do conceito que se pretende instalar na empresa. Depois de ser aprovado o plano, procede-se com a introdução do programa do TPM. Este arranque é muitas vezes uma reunião geral da empresa para a qual são convidadas empresas parceiras e subcontratadas. A Gestão de topo confirma o seu comprometimento com a implementação do TPM e informa acerca dos planos desenvolvidos e dos trabalhos produzidos durante a fase de preparação (Anexo B.1).

A terceira fase, Implementação: é a fase onde se procede à aplicação da metodologia, e esta tem a duração mínima de dois a três anos. Caso este período seja curto, é necessário alargá-lo, de modo que se obtenha sucesso na implementação do TPM. A implementação começa na sexta etapa, onde se começa com a eliminação das seis grandes perdas dos equipamentos, etapa onde são os operadores a desempenhar o papel fundamental, começando gradativamente a abandonar as tradicionais rotinas diárias para colocar em prática as rotinas do TPM (Anexo B.1).

A seguinte etapa dá início à implementação dos oito pilares do TPM. Também é importante referir que estes podem ser implementados com certa simultaneidade, visto que cada um dos pilares possuem uma certa interligação.

A última fase é conhecida como fase de Consolidação (Etapa 12): nesta fase deve-se conservar e aperfeiçoar as melhorias alcançadas ao longo de cada uma das etapas referidas. Deve-se quantificar o progresso alcançado e dar a conhecer a todos os colaboradores, no qual ajudará na compreensão e valorização do seu trabalho. Deve-se manter a filosofia da melhoria contínua, revendo os objetivos estabelecidos e propor novas metas, de modo a responder às necessidades da empresa (Anexo B.1).

Caso a implementação não tenha sido feita de forma rigorosa, sem preparação e planeamento a implementação tornar-se-á mais complicada em que se deverá realizar as devidas correções, modificações durante a implementação até atingir o objetivo de cada fase/etapa da implementação do TPM. Na figura 6.8 pode-se observar de forma

esquemática e resumida a restante parte do funcionamento do sistema proposto, que passa por implementar o TPM.

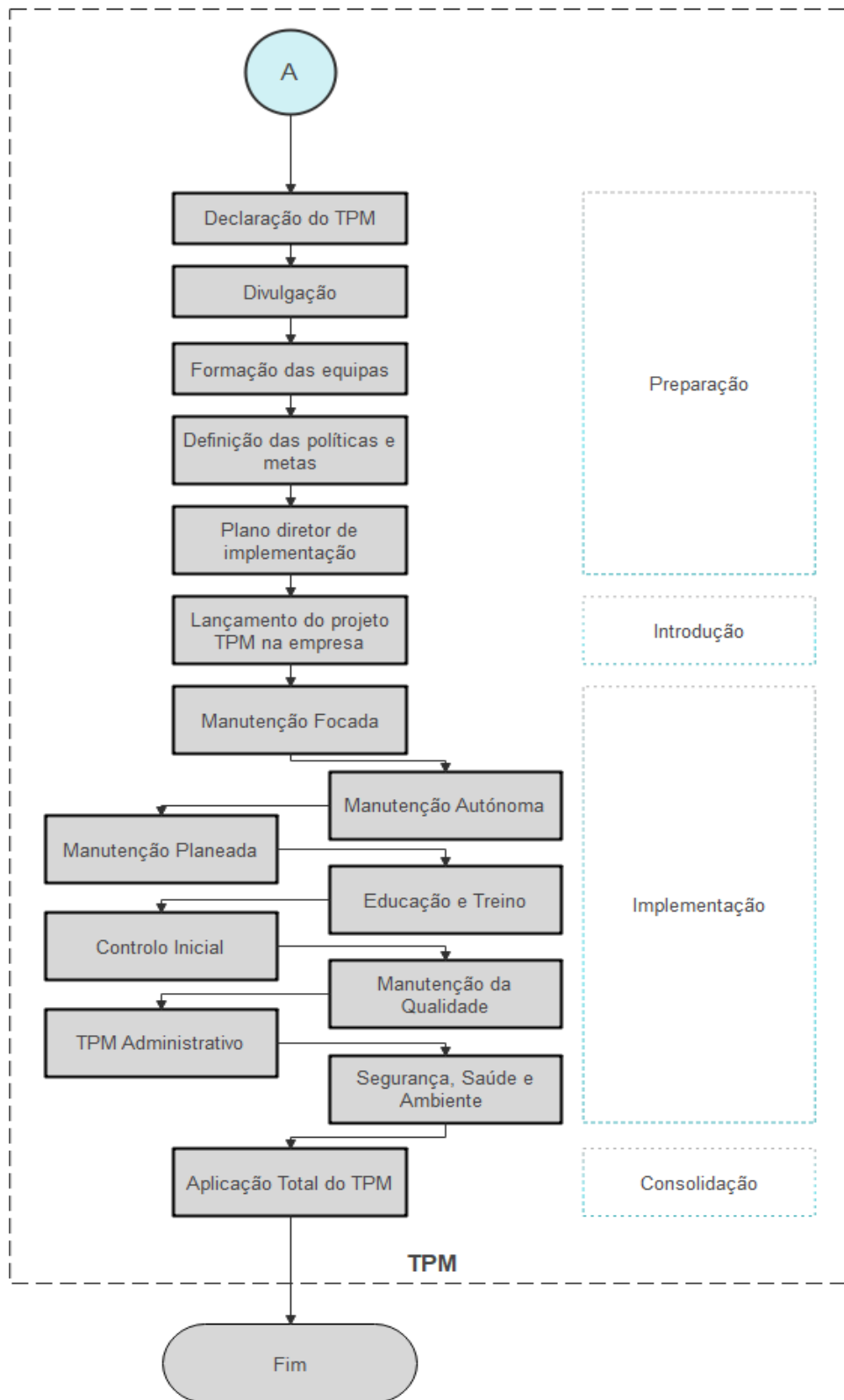


Figura 6.8 – Fluxograma da descrição do funcionamento do sistema (Continuação).

6.5. Nota Conclusiva

Ao longo deste capítulo foi apresentado um modelo de melhoria da gestão da manutenção com recurso à FL, mais concretamente à metodologia TPM e a I4.0. Também foram descritas todas as etapas para a sua implementação.

O sistema apresentado é baseado na arquitetura apresentada por Magadán *et al.* (2020), de forma a adequar-se e enquadrar-se da melhor forma aos objetivos delineados. Para a conceção do modelo, definiu-se que teria por base I4.0 para a monitorização em tempo real das máquinas e equipamentos, o que possibilita a recolha com precisão de parâmetros de elevada importância e que com a sua análise contribuirá para uma melhor tomada de decisão. Por outro lado, a introdução da FL vem contribuir para melhorar significativamente e obter uma melhoria contínua quer seja no departamento da manutenção, como também no sistema produtivo.

O sistema foi desenvolvido para assegurar a monitorização de forma contínua e precisa dos indicadores mais relevantes da manutenção e dos processos produtivos. Este é apoiado pela rede local de internet (sem fios) e BLE, assim como pelos vários dispositivos que permitem a recolha dos dados, armazenamento e sua visualização por meio de dispositivos móveis ou fixos. A monitorização é realizada por meio de um sensor sem fios que recolhe e transmite os dados para o *gateway*, que tem como objetivo receber os dados de todos os sensores existentes no chão de fábrica. O *gateway* processa os dados recebidos e após o seu processamento, envia-os para a *cloud*, que tem como objetivo armazenar toda a informação. Com recurso ao ThingSpeak também é possível a visualização dos dados em tempo real, por meio de qualquer dispositivo que tenha acesso à internet.

Por outro lado, neste capítulo também é apresentada e implementada a metodologia TPM. Esta, do modo geral, é feita em 4 fases e 12 etapas que dão suporte às atividades básicas de desenvolvimento, que constituem os requisitos mínimos para o desenvolvimento do TPM.

Para que a metodologia possa ser bem implementada e obter sucesso, assim como a melhoria do funcionamento das máquinas e equipamentos e dos operadores, devem ser criadas condições para que se possam eliminar as seis grandes perdas: falha/avaria do equipamento, configurações e ajustes, esperas ou micro paragens, perdas de velocidade, defeitos de qualidade e retrabalho e arranque, e mudanças de produtos, que

levam à melhoria do funcionamento do sistema produtivo, bem como ajuda no aumento da competência e motivação dos operadores.

O capítulo seguinte é dedicado à implementação deste modelo num estudo de caso. Este foi implementado num tapete transportador.

Capítulo 7

Estudo de Caso: Melhoria do Desempenho de um Tapete Transportador Através da Filosofia *Lean* e Indústria 4.0

O presente capítulo faz referência à fase de implementação do modelo desenvolvido. Este capítulo está dividido na apresentação da empresa que deu apoio quer no desenvolvimento do modelo como na implementação do mesmo, como também são apresentadas as fases de implementação do modelo adaptadas ao estudo de caso, mais concretamente ao tapete transportador.

7.1. Manutenção Industrial, Montagens e Engenharia, Lda.

A Manutenção Industrial, Montagens e Engenharia (MIME), Lda., é uma Pequena Média Empresa (PME), que deu início à sua atividade no ano de 2010, e que tem crescido exponencialmente ao longo dos anos. A empresa inicialmente dava assistência e serviços de manutenção. Face ao mercado e as suas constantes alterações, a MIME viu a necessidade de aumentar a oferta dos seus serviços. A empresa hoje apresenta um vasto leque, como soluções chave na mão, que engloba todo o acompanhamento desde a conceção e desenvolvimento do projeto, montagem e manutenção de instalações industriais. Esta também fornece serviços de montagem e manutenção de equipamentos desenvolvidos pelos mesmos ou de outras marcas, bem como a comercialização de peças de reserva entre outros serviços.

Atualmente, a atividade exercida pela MIME tem o seu principal foco na realização de trabalhos em ambientes industriais, com a principal inserção em fábricas que utilizam equipamentos e tecnologias de movimentação, despoeiramento e armazenamento de granel.

A MIME destaca-se na sua atividade pelos serviços que fornece de modo a ajudar o seu cliente a obter soluções das mais variadas áreas industriais como por exemplo: Indústria agropecuária, Indústria agroalimentar, Indústria biodiesel, entre outras. Esta diferenciação passa pelo acompanhamento contínuo e constante que a MIME oferece aos seus clientes que vai desde a fase inicial do projeto, até à sua implementação e

manutenção e a extensão dos seus serviços de manutenção a outras máquinas e equipamentos de outras marcas, conforme as necessidades dos seus clientes.

Dentro das máquinas e equipamentos, a empresa MIME apresenta um vasto leque de soluções e um catálogo diversificado em várias tecnologias de movimentação, despoeiramento e armazenamento em granel ou unitárias. Das várias tecnologias referidas, o trabalho é predominante nas tecnologias de movimentação de granel, já que a maioria dos equipamentos fabricados são equipamentos de transporte de matérias sólidas porque o mercado assim o exige. Dentro das tecnologias de movimentação de graneis, a empresa MIME fabrica na sua maioria transportadores, elevadores e sem-fim. Todos estes equipamentos apresentam características variadas consoante o caso em questão, desde diferentes capacidades, tipos de correntes e materiais utilizados.

7.2. Implementação do Modelo

A implementação do modelo desenvolvido passa pela sua introdução numa das soluções chave na mão desenvolvidas pela empresa MIME, ou seja, num dos clientes da MIME. Deste modo foi seleccionado um dos mais recentes, o transportador de tapete (Figura 7.1), para aplicar a arquitetura para a sua monitorização em tempo real.



Figura 7.1 – Tapete transportador.

Contudo, antes de iniciar a implementação do modelo e de modo a perceber todo o processo de fabrico, assim como a zona onde se irá implementar o modelo desenvolvido, foram realizadas várias visitas à fábrica, como também à área de transporte e movimentação de graneis, onde opera o tapete transportador, para procurar desperdícios, oportunidades de melhoria assim como recolher dados como o tempo de ciclo, disponibilidade diária, tempo entre reparações, tempo de reparações, entre outros parâmetros. Após algumas reuniões, estabeleceu-se a recolha de dados e a observação do processo e do funcionamento do tapete transportador ao longo de três turnos de oito horas. Cada turno é de 8 horas, com uma hora de paragem dada aos operadores, sendo esta hora dividida: 30 minutos para refeição, e dois períodos de 15

minutos para outras pausas ao longo do turno. Cada turno tem a capacidade de produção de 875 kg de ração animal. Também foram calculados os vários indicadores (conforme exposto em 3.3), antes de implementar o modelo. Após a implementação do modelo, foi possível ver e registar esses mesmos indicadores de forma fácil e rápida conforme, sendo estes analisados no ponto a seguir.

De modo a facilitar a implementação do modelo, esta fase foi dividida em duas partes. Uma fase inicial em que se preparou o sistema de monitorização. Esta fase serviu para perceber como introduzir o sistema de monitorização no tapete transportador existente, bem como refinar e adaptar o mesmo em ambiente fabril⁶. No que diz respeito aos serviços de manutenção, incluem: a elaboração de planos, procedimentos e rotinas de manutenção, para o bom funcionamento das máquinas e equipamentos desenvolvidos, assim como outros documentos de suporte às atividades inerentes à manutenção. Para melhorar os serviços prestados, propõe-se a aplicação do modelo apresentado na correia transportadora (Figura 7.2).

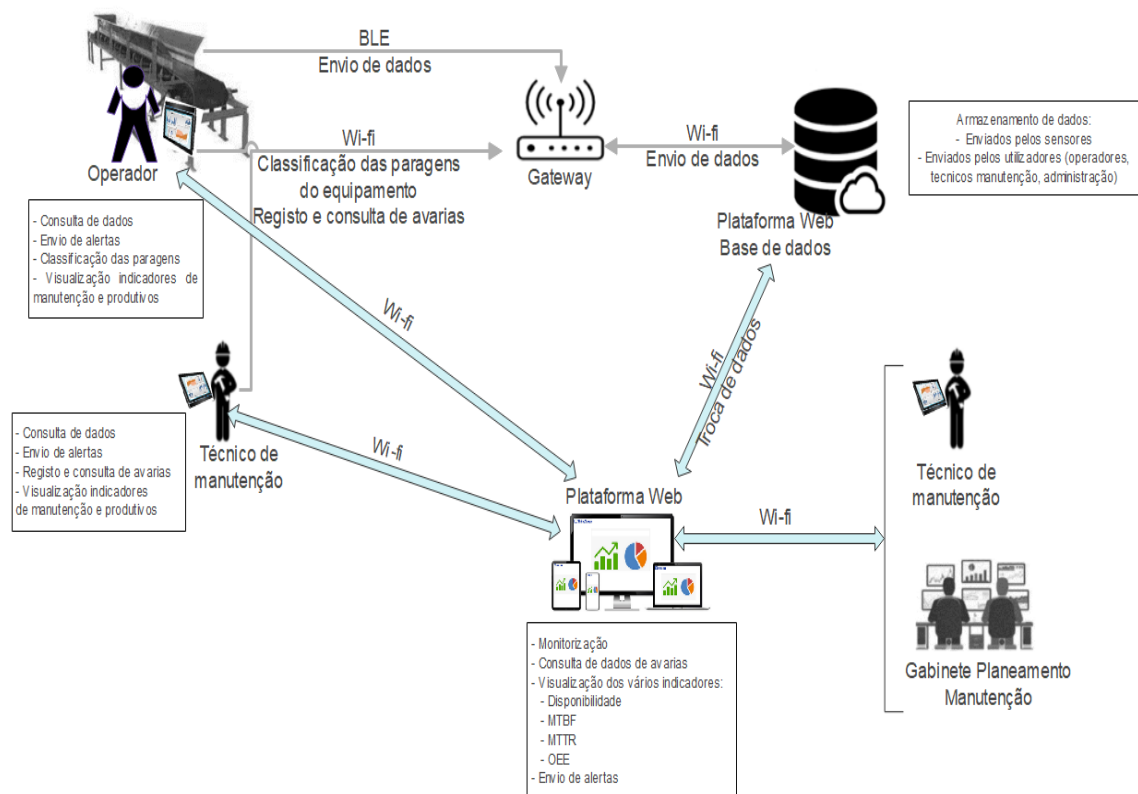


Figura 7.2 – Modelo adaptado ao estudo de caso.

⁶ Resultou no artigo: Mendes, D., Gaspar, P. D., Charrua-Santos, F., & Navas, H. (2023). Enhanced Real-Time Maintenance Management Model—A Step toward Industry 4.0 through Lean: Conveyor Belt Operation Case Study. *Electronics*, 12(18), 3872. <https://doi.org/10.3390/electronics12183872>

Assim, para monitorizar a correia transportadora, vários dispositivos tiveram de ser montados: sensor USB Beacon 306 de abril, Raspberry Pi 3 Modelo B+, OUKITEL Rugged Tablet e o módulo de sensor infravermelho TCRT5000, microcontrolador Arduino Nano 33 BLE.

Inicialmente, foi analisado o funcionamento da correia transportadora em questão. Além de analisar o seu funcionamento, foi necessário compreender e identificar o respetivo contador ou relé no quadro elétrico. Analisando o esquema elétrico e o funcionamento da correia transportadora, foi possível identificar o contador. Após análise do painel elétrico, identificou-se o respetivo contador. Para possibilitar a conexão do sensor escolhido, foi utilizado um conversor AC para DC, comumente utilizado em vários tipos de carregadores para dispositivos móveis alimentados por USB, onde na figura 7.3 é possível ver o diagrama de conexão realizado.

Se não for possível introduzir o sensor escolhido neste modelo, este pode ser substituído por outro após um estudo prévio. O modelo deve ser devidamente adaptado, tanto no que diz respeito ao protocolo de comunicação entre os vários dispositivos e a nuvem, mas também à adaptação adequada do *software* e da programação.

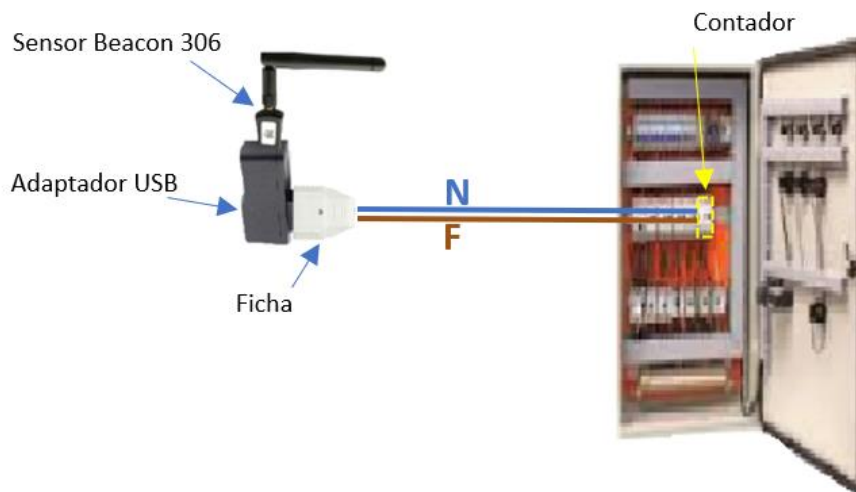


Figura 7.3 – Diagrama de conexão elétrica realizado no painel elétrico.

Os dados recolhidos pelos sensores são enviados para a nuvem, onde o *gateway*, através do protocolo de comunicação BLE, permite fazer a ponte entre eles. Além disso, o *gateway* tem a função de permitir a comunicação entre os vários sensores que compõem o sistema com a camada de nuvem.

Para que o operador classifique as várias paragens, é também necessário disponibilizar um *tablet* para cada uma das máquinas e equipamentos para facilitar a sua classificação. A classificação de falhas é possível através da plataforma criada e disponibilizada pela ThingSpeak. O *tablet* a ser incorporado ao sistema é o OUKITEL Rugged Tablet ou outro que tenha a possibilidade de aceder à rede de internet.

Finalmente, na camada de nuvem, uma versão gratuita do ThingSpeak, um serviço de plataforma analítica IoT, é implementada, permitindo assim a visualização e análise de dados coletados por sensores em tempo real na nuvem (Figura 7.2).

A Figura 7.4 apresenta de forma resumida e esquemática o funcionamento do modelo. Uma vez instalada a arquitetura que compõe o sistema de monitorização, o sensor April USB Beacon 306 recolhe e transmite os dados para o *gateway* através do protocolo de comunicação BLE. Caso o tapete transportador fique inoperacional, o operador pode utilizar um *tablet* para proceder ao alerta e introduzir dados. Por outro lado, o módulo sensor TCRT5000 contabiliza as peças com e sem defeitos (se aplicável). Devem ser instalados dois sensores, um para contagem das peças sem defeitos e outro para contagem das peças defeituosas. Toda a informação recolhida é transmitida para o *gateway*, onde é processada e analisada. Utilizando um dispositivo com acesso à internet, será possível visualizar os indicadores em tempo real, o que permitirá à área de manutenção ajustar as suas estratégias.

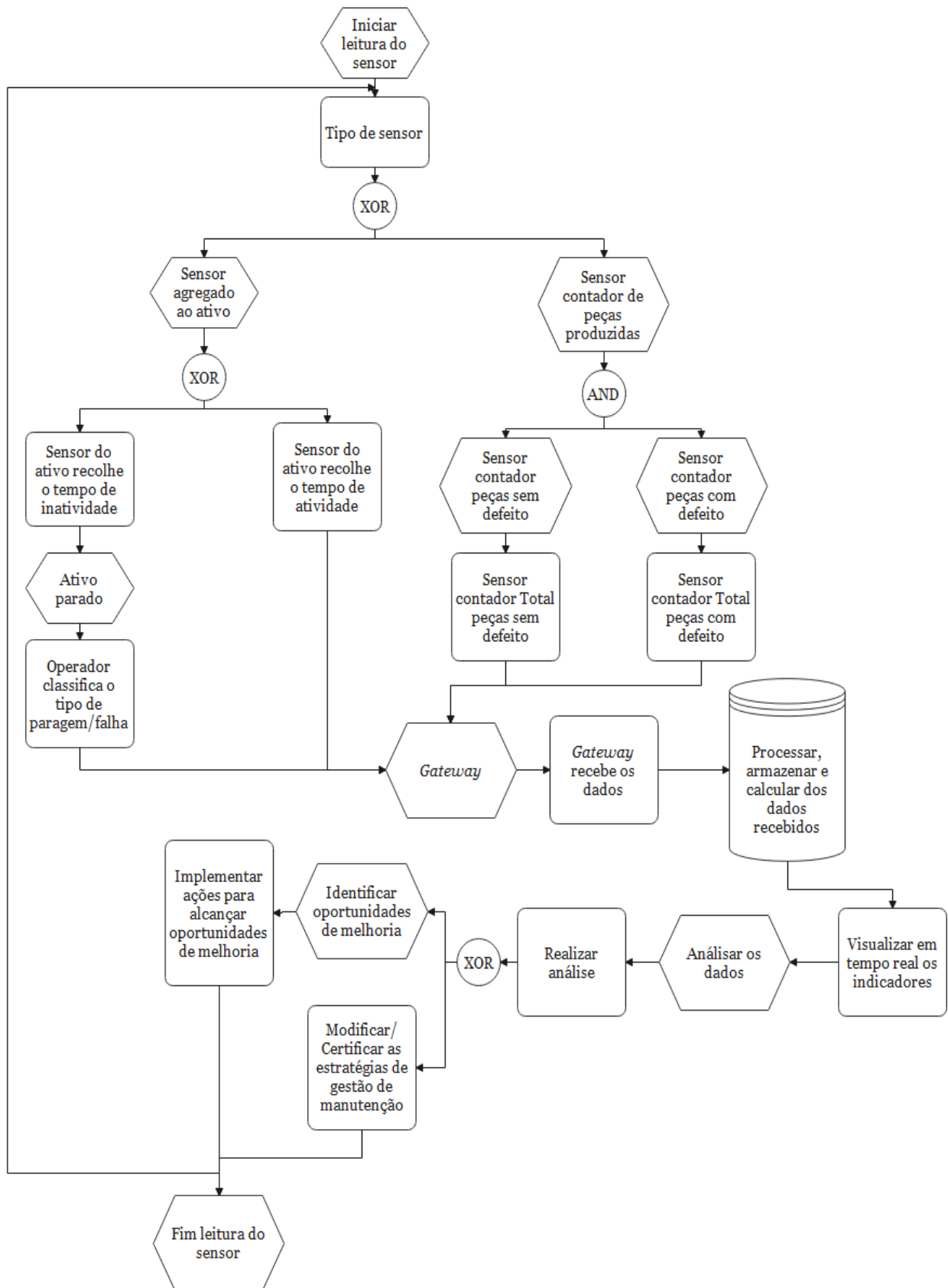


Figura 7.4 – Fluxograma que descreve o funcionamento do sistema proposto.

Tendo já sido instalado e testado o sistema de monitorização, e verificada a aplicabilidade do sistema, procedeu-se com a restante implementação do modelo, que corresponde à introdução da metodologia TPM⁷. Seguidamente são apresentados os oito pilares que suportam a TPM na área onde opera o tapete transportador.

7.2.1. Melhoria Focada

O pilar Melhoria Focada é composto por uma equipa multidisciplinar, focalizado em gerir o equipamento, especialmente na sua melhoria. Tem como objetivo a identificação e sistematização das perdas nas máquinas e nos processos produtivos, aumentar as eficiências globais dos equipamentos e processos, eliminando todas as perdas através de uma prática sistemática dos grupos de melhoria (Melo & Loos, 2018; Singh & Singh, 2020; Xiang & Chin, 2021).

Iniciaram-se os trabalhos de planeamento do pilar de melhoria focada para aumentar a disponibilidade do tapete transportador onde se identificaram as perdas de produtividade que o processo apresenta, de forma a eliminá-las ou reduzi-las.

Uma ferramenta da qualidade amplamente utilizada para a análise de problemas e tomada de decisão é o Diagrama de Pareto (Hossen *et al.*, 2017). Este diagrama permite ordenar os dados por ordem decrescente das ocorrências. Desta forma, foram observadas, durante 3 semanas, as causas das perdas de produtividade no tapete transportador, bem como a realização de uma análise do registo do histórico de manutenção do mesmo, assim deve-se representar os dados retirados num Diagrama de Pareto como se por verificar na Figura 7.5. Pelo Diagrama de Pareto, verificam-se que as causas mais significativas para as perdas produtivas durante o processo são: raspador, emenda danificada e correia desalinhada. Com base na análise dos dados, a introdução dos seguintes pilares têm em vista a elaboração de planos e ações de modo a aumentar a disponibilidade do tapete transportador.

⁷ Resultou no artigo: Mendes, D., Gaspar, P. D., Charrua-Santos, F., & Navas, H. (2023). Integrating TPM and Industry 4.0 to Increase the Availability of Industrial Assets: A Case Study on a Conveyor Belt. *Processes*, 11(7), 1956. <https://doi.org/10.3390/pr11071956>

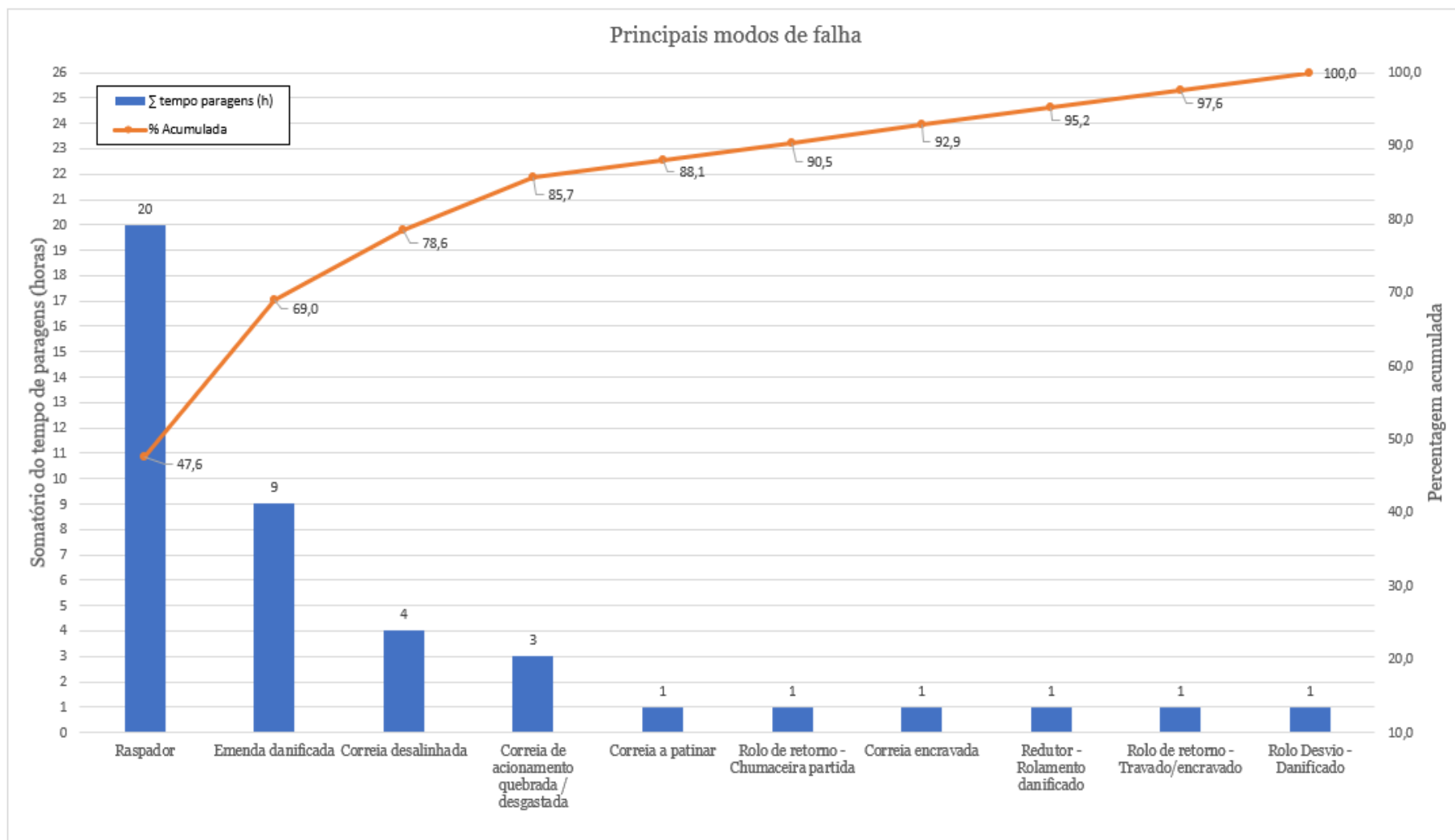


Figura 7.5 – Diagrama de Pareto – Análise dos principais modos de falha.

7.2.2. Manutenção Autônoma

O pilar MA permite combinar o conhecimento técnico do departamento de manutenção com a experiência adquirida no quotidiano de utilização da máquina. Isto possibilita que os operadores realizem tarefas simples, lubrificações, limpeza, verificações visuais e manuais, e substituições de alguns componentes danificados.

Para levar a cabo a implementação da MA no tapete transportador, é necessário seguir um plano pré-definido. Neste, foram determinadas cada uma das fases do plano, assim como o que seria necessário realizar em cada uma destas. O plano baseou-se na estrutura apresentada na Figura 6.3. Desta forma, foi constituída uma equipa composta pelos elementos que trabalham com o tapete transportador, bem como com os técnicos e responsáveis da manutenção deste ativo.

Assim, iniciou-se a implementação da MA, dando início à limpeza inicial. Nesta fase os operadores realizaram as atividades de limpeza que visaram a eliminação de todo o pó e sujidade do equipamento selecionado e da zona envolvente do mesmo. Também foram inspecionados todos os elementos constituintes do ativo assim como da zona envolvente.

Seguidamente, procedeu-se à eliminação de possíveis fontes de sujidade (passo 2). Procuraram-se as possíveis fontes de sujidade e pó, tendo-se identificado, que uma das formas que poderia contribuir para reduzir a sujidade e melhorar a limpeza, seria colocar um caixote do lixo próximo, promovendo a limpeza e reduzir os tempos desta atividade. Para estabelecer padrões de limpeza, lubrificação e rotinas de verificação (passo 3), foram feitas várias reuniões com os operadores, técnicos e responsáveis de manutenção com o objetivo de elaborar um plano de MA, que possa contribuir para eliminar os problemas do dia-a-dia e deixar o equipamento em perfeito estado de utilização.

De forma a dar continuidade à implementação deste pilar (passo 4), procedeu-se à formação e treino dos operadores, para estes sentirem-se capazes de distinguir se um ativo está com alguma anomalia ou a operar corretamente. Foi desenhado um plano geral das atividades a realizar (Anexo B.3). O plano também indica as ferramentas necessárias para a sua realização. De modo a alicerçar esta fase, procedeu-se à realização de sessões de manutenção básica, abordando exemplos ao longo dessas mesmas sessões, no chão de fábrica. Por outro lado, se a explicação/exemplificação fosse realizada no posto de trabalho, por vezes a explicação era apoiada com a folha

LPP. De seguida, procedeu-se à implementação da MA, onde se procedeu ao acompanhamento das atividades de MA planeadas.

Com a informação e a formação adquirida por parte dos operadores (passo 5), e com a supervisão dos responsáveis pela manutenção os operadores começaram a realizar pequenas tarefas afetas à MA planeada. No passo 6, focou-se na melhoria do posto de trabalho, que consistiu em ações de organização, arrumação e padronização por meio da gestão visual do local de trabalho. De modo a criar um posto de trabalho sem perdas, por meio de uma boa organização e processos eficientes. No sétimo passo, são realizadas todas as atividades inerentes à MA total.

Para o operador seguir o plano de MA (quarto passo), no qual se observaram instruções de limpeza e inspeção, realizou-se a análise dos planos de manutenção preventiva existentes até à data. Esta análise consiste em avaliar a complexidade das operações de manutenção, para que seja feita a seleção das tarefas que podem ser realizadas pelos operadores. Também se recorre aos manuais dos equipamentos, ao *feedback* dos operadores e ao conhecimento dos técnicos de manutenção para complementar o conjunto de ações a implementar. No Anexo B.3 é apresentado o plano de MA para o tapete transportador. Este plano contém as atividades a serem realizadas pelo operador, quer de inspeção, limpeza e lubrificação, a regularidade das mesmas bem como as ferramentas a serem utilizadas para cada uma das atividades.

Durante a realização da limpeza e inspeção, passo 1, sempre que fosse detetado um problema, e de modo a facilitar a visualização dos mesmos é colocado em cada anomalia uma etiqueta azul ou vermelha. A etiqueta azul (Anexo B.4), corresponde às anomalias que a equipa de produção é capaz de resolver, sendo que estas atividades ficam na responsabilidade da sua concretização por esta equipa. A etiqueta vermelha (Anexo B.4) corresponde à identificação de problemas que a equipa de produção não consiga solucionar ou não tenha ferramentas ou valências para o efeito. Pelo que terão de ser eliminados pelas equipas de manutenção. O preenchimento até à data é feito manualmente, contudo a empresa, num futuro próximo pretende que o preenchimento das etiquetas seja informatizado, estando previsto num futuro próximo o incremento do preenchimento das etiquetas no sistema proposto.

As folhas e todo o material facultado aos operadores na formação e treino são elaboradas a computador. A exposição do conteúdo é feita numa área próxima ao departamento da manutenção da empresa. A empresa tenciona melhorar as condições

relativamente à formação e treinos, pois vê este investimento importante para melhorar o funcionamento da mesma.

7.2.3. Manutenção Planeada

A implementação do pilar MP é realizada a partir da avaliação do equipamento e levantamento da situação atual. Tendo conhecimento atual, o próximo passo é bloquear a deterioração acelerada, assim como melhorar os pontos fracos do equipamento.

Deste modo, realizou-se uma reestruturação do plano de manutenção do tapete transportador, adequando a periodicidade das intervenções da manutenção, assim como nas atividades necessárias para manter o equipamento no seu estado ideal de operação de acordo com a sua utilização e importância no sistema produtivo.

O plano de manutenção preventiva existente até à implementação do TPM estava constituído por: Acionamento, Estação motriz, Estação tensora, Corpo e Sistema elétrico. O Acionamento, no que concerne ao motor, as inspeções de ruído, temperatura eram feitas mensalmente. A limpeza do mesmo, era realizada a cada quinze dias. No conjunto de transmissão, a inspeção do estado da corrente e o alinhamento era semanalmente. Quanto à estação motriz, a lubrificação era feita mensalmente, a inspeção de fixação e de ruído diariamente. Relativamente à estação tensora, a lubrificação das chumaceiras/rolamentos mensalmente, a inspeção e verificação semanalmente. A inspeção dos restantes componentes (roda tensora, esticadores, entre outros) a cada mês. O corpo, com os elementos: calhas, cunhos e corrente arrasto as inspeções a cada mês. O sistema elétrico quanto ao quadro de potência e o quadro de comando as inspeções era a cada dois meses. As restantes tarefas eram executadas, após a verificação de uma falha em intervenções de manutenção corretiva.

Com a inclusão da MA, operadores mais capacitados e cientes da importância do seu trabalho contribuirá para um melhor funcionamento dos ativos, mas também contribui para que certas intervenções não planeadas possam ser reduzidas, pela correta utilização dos equipamentos por parte dos operadores. Assim a manutenção planeada e com uma atitude proativa por parte quer dos operadores e técnicos de manutenção possibilita que o ativo esteja o máximo tempo possível disponível aumentando a sua produtividade. Os técnicos de manutenção passam a ajudar a formar os operadores para que estes possam operar as máquinas de uma melhor forma e poderem também executar as condições básicas de manutibilidade da máquina, bem como realizar ações

de inspeção e identificação precoce de indícios de anomalias nos equipamentos durante a produção e correta operação, eliminando-os.

Na Figura 7.6 podem-se verificar um excerto do plano de manutenção preventiva para o tapete transportador (Anexo B.5). O plano foi realizado de acordo com as condições de utilização atual do mesmo.

Plano Manutenção Preventiva			
Identificação do Equipamento			
Código: 08.TT.04	Designação do equipamento: Tapete de Tela		
Marca: MIME			
Modelo: TT0.1	Localização: LP1		
Data: _/_/___	Hora: _____		
Nota:	Manutenção ou inspeção a realizar com o equipamento em: F -Funcionamento; I -Imobilizado		
Acionamento			Regularidade
Motor Elétrico	1 - Inspeção temperatura do motor (Termografia)	F	Semanal
	2 - Inspeção temperatura da caixa redutora	F	Semanal
	3 - Inspeção ruído funcionamento motor	F	Diário
	4 - Inspeção ruído funcionamento redutor	F	Diário
	5 - Inspeção estado/limpeza do motoredutor + ventoinha		I Semanal
	6 - Inspeção estado da fixação do motoredutor	F	Mensal
	7 - Limpeza motor		I Mensal
Conjunto transmissão	1 - Inspeção visual estado da corrente / carretos	F	Semanal
	2 - Inspeção visual fixação das chumaceiras		I Semanal
	3 - Inspeção visual esticamento / alinhamento da corrente	F	Semanal
	4 - Inspeção estado / fixação do resguardo	F	Semanal
	5 - Lubrificação com massa		I Quinzenal
	6 - Limpeza conjunto mecânico		I Mensal

Figura 7.6 – Excerto do Plano da Manutenção preventiva.

7.2.4. Formação e Treino

O programa TPM impõe uma mudança cultural muito forte, que gera a necessidade de capacitar as pessoas para os seus novos papéis. É através do pilar Formação e Treino que se confere aos operadores maior capacidade autónoma de trabalho. Só com colaboradores dotados de um amplo conhecimento, polivalentes, devidamente motivados, a metodologia TPM vai conseguir evoluir, e a superação ou redução de problemas relacionados com avarias ou falhas vai ser possível.

Os operadores não devem ser treinados apenas em operações de produção, mas também, em procedimentos de manutenção, sendo responsabilidade dos técnicos de manutenção treiná-los em inspeção, ajuste, limpeza e em procedimentos de reparação. Desta forma, os operadores aprendem rapidamente como desenvolver melhorias no equipamento. A ferramenta utilizada para multiplicar o conhecimento além do trabalho

realizado entre os colaboradores é conhecida como LPP. Na Anexo B.2 é possível observar a folha criada para poder levar a cabo as LPP.

7.2.5. Gestão Precoce do Equipamento

Este pilar estimula o uso de todos os conhecimentos desde o desenvolvimento como da manutenção de produtos/equipamentos já concebidos na conceção de um novo equipamento.

Na área da manutenção colaboram em conjunto vários colaboradores com diferentes conhecimentos e experiências adquiridas. Todos estes conjuntos de conhecimentos são utilizados nos projetos em curso ou em novos, contribuindo para que erros já identificados quer em fase de desenvolvimento ou já com o produto/serviço acabado, possam não ser repetidos.

No que concerne ao tapete transportador de forma a promover um alto alinhamento do mesmo, os rolos devem ter uma forma de rolo esférico, abaulado. A utilização do rolo esférico abaulado irá possibilitar o tapete transportador se manter mais estável e alinhado. Para melhorar a segurança este deve ter todas as partes de transmissão de movimento com os respetivos resguardos. De modo a dosear a quantidade de entrada do produto, o incremento de um dispositivo de doseamento, irá permitir controlar e dosear a entrada do produto no mesmo. Este dispositivo tem como principal objetivo conseguir controlar as quantidades de produto a movimentar, uniformizar o fluxo de produto ao longo do tapete, mantendo escoamento do produto constante, sem obstruções do tapete transportador, evitando encravamentos e o desgaste prematuro do tapete ou a sua rotura fazendo com que este opere sem estar sobrecarregado.

7.2.6. Integração da Qualidade

Este pilar do TPM tem o foco de capacitar os colaboradores para a integração da qualidade, reduzindo as falhas que prejudicam a qualidade do produto, com a missão de implementar um modelo de produção que reduza os defeitos no produto.

No que concerne ao tapete transportador é um equipamento muito sensível, pelo que qualquer partícula estranha e involuntariamente se insira no mesmo apresenta uma forte probabilidade de causar defeitos na superfície dos tapetes, matéria-prima ou produto acabado que possa estar a ser movimentado na linha de produção, o que é um problema de qualidade. De forma a saber identificar fontes de contaminação, ou seja,

conseguir identificar as causas raiz, alguns técnicos receberam formação específica nesta matéria para estarem aptos neste âmbito.

7.2.7. TPM na Administração

O TPM na Administração visa melhorar a eficiência e eficácia dos processos administrativos bem como eliminar as suas perdas (exemplo: perda pela avaria do equipamento do escritório, tempo gasto na recuperação de informação, etc.).

Desta forma, foi implementado no departamento da manutenção, e no serviço administrativo que dá apoio a este departamento. Primeiramente foi feita uma análise de todos os recursos e documentos utilizados nesta área, nas mesas, gavetas e armários, eliminando tudo o que não é necessário, através da contabilização e seleção dos documentos e materiais estritamente necessários, eliminado assim os recursos e documentos obsoletos. Seguidamente, definiu-se o local para guardar cada recurso, onde também foi colocada etiquetas e sinalização por cores de modo a facilitar o acesso, arrumação e a reposição dos recursos e documentos. De modo a manter-se esta área limpa, realizou-se um plano de limpeza diária de modo a promover a manutenção da limpeza e arrumação de todo o espaço. Em termos da utilização de todo o material da área administrativa, computadores, telefones, impressoras, foram dadas formações de modo a qua estes possam ser utilizados mais eficientemente e reduzir problemas de indisponibilidade destes e má utilização bem como no que concerne à saúde e má postura neste local de trabalho. Também se procedeu à reorganização do *layout* do escritório, identificando e sinalizando compartimentos e ambientes, bem como ordenando os recursos e documentos nas mesas, armários e locais por meio de cores e etiquetas.

7.2.8. Segurança, Saúde e Ambiente

Este pilar deve ser visto de forma a conseguir atingir todas as metas da empresa bem como as necessidades de cada cliente, de forma saudável quer para os colaboradores como para o meio ambiente, procurando garantir zero acidentes, zero doenças profissionais e zero acidentes ambientais.

A unidade responsável por este departamento tem contribuído consideravelmente através da realização de ações de formação. Esta tem implementado no chão de fábrica vasos de retenção e bacias, para controlar/eliminar derrames de óleo no pavimento, evitando possíveis acidentes. Esta alteração também vem contribuir para promover a

economia circular no que concerne a este tema, contribuindo de forma benéfica para o meio ambiente.

Foram colocados *kits* de retenção para serem utilizados em caso de derrame acidental de óleo ou produto contaminante em quantidade considerável no pavimento. Os operadores também tiveram formação e treino para que possam controlar da melhor forma estes episódios, de forma a conter o problema até à chegada da entidade ou responsáveis nomeados dentro da empresa para a resolução do problema.

Na utilização da iluminação, tem desenvolvido um trabalho notável, tanto no que deve ser acionado de forma manual, como também na situação em que é possível instalar dispositivos automáticos de ligar e desligar. No equipamento, o acionamento de determinados órgãos foi alterado, para que funcionassem apenas quando são estritamente necessários. As referidas atuações resultam também em poupança de energia.

Um exemplo da mudança é a ligação da iluminação existente no entorno ao tapete transportador. Quando este é ligado, a iluminação de cima também foi ativada. A iluminação costuma estar acesa, em dias com boa iluminação natural. Desta forma, o sistema de iluminação foi alterado. Agora a iluminação é acesa por meio de um interruptor, que permite abrir e fechar a passagem de corrente elétrica sempre que necessário.

7.3. Nota Conclusiva

Ao longo deste capítulo foi apresentada a empresa que identificou e facilitou a realização do estudo de caso. A introdução do modelo é feita numa das soluções chave na mão desenvolvidas pela empresa MIME, mais concretamente a um tapete transportador.

Ao longo da implementação foi possível observar a evolução que o modelo proposto teve ao longo da realização da presente tese. Inicialmente, o modelo apresentado e implementado tinha por base a arquitetura que compunha o sistema de monitoração, assim como a introdução dos conceitos da MA.

Após várias reuniões com os responsáveis, e de modo a atender às necessidades operacionais onde o tapete transportador opera, o modelo evoluiu, englobando na totalidade os pilares que constituem o TPM. Estes pilares foram incorporados após a implementação do sistema de monitorização e a realização dos respetivos acertos e

testes. Assim, procedeu-se à implementação dos 8 pilares do TPM, estando até ao momento em fase de implementação nas restantes áreas da empresa.

No capítulo seguinte são discutidos todos os aspetos relevantes fruto da realização deste estudo de caso, assim como as limitações encontradas.

Capítulo 8

Discussão de Resultados e Limitações

No presente capítulo é realizada a discussão dos resultados. Também neste capítulo são abordadas as limitações inerentes ao trabalho desenvolvido.

8.1. Discussão de Resultados

A área de manutenção deve maximizar a vida útil dos ativos e ferramentas, assim como proporcionar a recuperação bem-sucedida de peças e máquinas que são usadas durante as atividades de fabrico, especialmente peças-chave de produção, como o tapete transportador, para entregar um produto final conforme o esperado, dependendo da sua origem ou objetivo de produção. O departamento de manutenção é fundamental para alcançar tais objetivos (Hou *et al.*, 2019; Kirjanów-Błazej *et al.*, 2022; Miao *et al.*, 2022). De forma a fazer frente aos desafios que a manutenção encontra no dia-a-dia, bem como acompanhar os desafios dos mercados cada vez mais globais e competitivos, são muitos os responsáveis da manutenção que procuram identificar novas ferramentas, metodologias e conceitos que possam contribuir para alicerçar e melhorar as atividades desta área vital no seio das empresas.

A utilização exclusiva de metodologias e ferramentas inerentes aos conceitos de Manutenção, FL e I4.0 já são amplamente utilizadas em contexto industrial. Em relação à FL, Palmeira *et al.* (2015), Lopes *et al.* (2016), Ebeid *et al.* (2016), Gupta *et al.* (2017), Pinto *et al.* (2019), Costello *et al.* (2019), Hassan *et al.* (2020) e Arsakulasooriya *et al.* (2023), afirmam que a aplicação bem-sucedida desta filosofia na área da manutenção permite alcançar melhores níveis de gestão, bem como melhorar a tomada de decisões, as intervenções da manutenção e a sua qualidade. Além disso, permite reduzir os prazos de entrega dos equipamentos, reduzir os custos de fabrico e distribuição, aumentar a produtividade (obter maiores benefícios na fabricação dos mesmos produtos) e melhorar a qualidade dos produtos, bem como um melhor controlo de desperdícios nos processos de fabrico e nas intervenções de manutenção. Por outro lado, com o surgimento da I4.0, a manutenção preditiva torna-se muito relevante como alternativa à gestão tradicional da manutenção dos ativos. Esta estratégia de manutenção possibilita ter ativos físicos inteligentes, permitindo a aquisição e armazenamento do histórico de falhas, reparações e custos. Esta condição promove a melhoria da precisão e eficácia do planeamento da manutenção, compensando as desvantagens dos sistemas tradicionais de gestão da manutenção. Anh

et al. (2018), Rousopoulou *et al.* (2020), Jasiulewicz-Kaczmarek *et al.* (2020), Mey *et al.* (2021), Senthil *et al.* (2022), Converso *et al.* (2023) e Ahmed *et al.* (2023) afirmam que o aumento da I4.0 permite alcançar melhorias significativas na área da manutenção, como a detecção precoce de falhas, executando assim intervenções quando estritamente necessárias, ao mesmo tempo que prolonga a vida útil dos equipamentos e aumenta a disponibilidade dos ativos. Embora os referidos modelos sejam amplamente utilizados para preencher lacunas no sistema tradicional de gestão de manutenção, estes são maioritariamente desenvolvidos para realizar a monitorização em tempo real dos parâmetros de condição relacionados com a manutenção preditiva.

O modelo apresentado foi implementado a um estudo de caso, mais concretamente a um tapete transportador. Vários autores, como Rousopoulou *et al.* (2020), Jasiulewicz-Kaczmarek *et al.* (2020), Magadán *et al.* (2020), Achouch *et al.* (2020), Abidi *et al.* (2022), Tortorella *et al.* (2022), Zhang *et al.* (2023) e Zhang *et al.* (2023) tem vindo a desenvolver sistemas para melhorar o funcionamento dos ativos físicos. No entanto, o modelo desenvolvido difere da maioria dos trabalhos científicos publicados até ao momento analisados, pois a maioria dos modelos desenvolvidos são para possibilitar a monitorização de parâmetros de condição.

Para conter os custos e permitir que o sistema seja de baixo custo, o seu desempenho pode ser influenciado pela distância máxima entre os vários dispositivos que compõem o sistema, uma vez que nem todos os dispositivos têm o mesmo alcance de comunicação. Esta limitação pode ser ultrapassada através da alteração dos dispositivos escolhidos e do protocolo de comunicação, o que pode influenciar o custo final. A frequência com que o *gateway* procura os dados do sensor influencia significativamente o seu potencial para sofrer bloqueios. Quando os intervalos de pesquisa são relativamente curtos, isso pode levar o *gateway* a ficar sobrecarregado e bloqueado.

Zhou *et al.* (2015) e Boubiche *et al.* (2018) apontam que o processamento de uma grande quantidade de dados em redes de sensores sem fio é um desafio crítico e uma tarefa de processamento exigente, onde a coleta desses mesmos dados se torna crítica e pode levar a bloqueios. Assim, desta forma e para resolver este problema, é aconselhável ajustar a frequência de pesquisa para os vários dispositivos, alargando os períodos entre pesquisas. Por exemplo, em vez de o *gateway* procurar dados a cada 10-30 segundos, recomenda-se designar intervalos mais longos na ordem dos minutos (por exemplo a cada 10 minutos). Ao implementar essa abordagem, a probabilidade do

gateway ser bloqueado é reduzida, garantindo um processo de coleta de dados mais suave e eficiente.

Vale ressaltar que a contabilização e a pesagem da ração ocorrem em toda a cadeia produtiva. No entanto, uma verificação final da ração produzida é realizada através da contagem do número de sacos. Qualquer alimento que não se enquadre nos padrões de qualidade é pesado manualmente diariamente. Esta prática específica pode ser facilmente abordada através do aumento do número de sensores de carga compatíveis com os protocolos de comunicação existentes dentro da arquitetura de monitorização proposta.

Após a instalação de todos os componentes que compõem o sistema de monitorização procedeu-se ao teste piloto. Este teste, permitiu o arranque da introdução do modelo. Pela Tabela 8.1, é possível ver os resultados obtidos a partir de diferentes paragens que ocorreram entre 10h e 12h em um dia específico. Nessas duas horas, foram registadas 6 paragens, totalizando 15 minutos e 43 segundos de tempo de inatividade. Fazendo com que o tapete transportador estivesse a operar aproximadamente 88,6% do tempo observado. Estas paragens foram causadas por problemas relacionados com encravamentos e desalinhamento.

Tabela 8.1 – Registo das paragens do tapete transportador durante a realização do teste piloto (2 h).

Hora da paragem	Tempo de reparação	Classificação da falha
12:48:27	0 h:5 min:40 s	Encravamento do tapete transportador
12:11:08	0 h:2 min:04 s	Desalinhamento do tapete
11:42:33	0 h:4 min:21 s	Encravamento do tapete transportador
11:02:11	0 h:1 min:06 s	Desalinhamento do tapete
10:40:02	0 h:0 min:49 s	Encravamento do tapete transportador
10:10:40	0 h:1 min:30 s	Encravamento do tapete transportador

Relativamente ao desalinhamento, o técnico procede à inspeção, e deve identificar se o desalinhamento é pela queda descentralizada do material; comprimento da correia incorreta, ou se a correia não está tensionada corretamente. Neste caso em particular, o problema incide na queda descentralizada da matéria-prima. Deste modo, de forma a corrigir este problema, procedeu-se à correção e ao alinhamento do doseador de modo que a queda da matéria-prima incida mais ao centro possível da correia. Outra causa que também propicia o desalinhamento, como também o encravamento do tapete transportador, é a acomodação excessiva de material. Conforme a Tabela 8.1, o tapete transportador ficou encravado 4 vezes. Neste caso, o técnico procede a inspeção em

torno do tapete transportador e verifica se existe acumulação de material. Este, deve proceder ao ajuste (se aplicável) dos raspadores e limpadores do tapete transportador, de modo que o sistema de limpeza possa estar devidamente posicionado. Seguidamente, deve proceder à limpeza da correia, com uma escova ou ar comprimido para assim remover o material acumulado.

De modo a verificar se o sistema proposto funcionava corretamente, encontrar limitações, assim como identificar oportunidades de melhoria, ao longo de 3 semanas, acompanhou-se todo o funcionamento do tapete transportador. Também importa salientar que a empresa trabalha 5 dias por semana, com 3 turnos de 7 horas (já com os descontos para refeições e outras pausas para os trabalhadores). Pela Figura 8.1, observa-se que das 105 horas do tempo semanal, em média cerca de 14 horas, o tapete transportador está parado, sendo necessário reduzir este tempo de modo a aumentar a disponibilidade do mesmo e, conseqüentemente a sua produtividade. Por outro lado, o tempo médio de funcionamento é de cerca de 11,4 horas na primeira e terceira semana. Sendo o tempo médio de funcionamento de 10,1 horas na segunda semana. O tempo médio de reparação ao longo das 3 semanas é de 1,7 horas por intervenção.

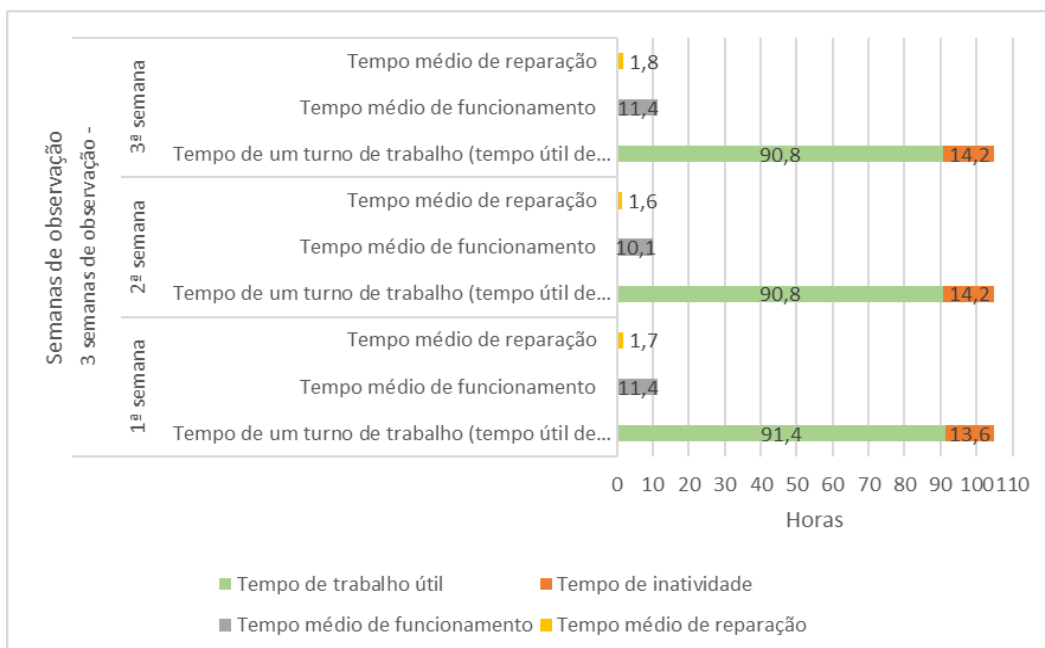


Figura 8.1 - Comparação de tempo útil de trabalho, tempo de inatividade, tempo médio de operação e reparação.

Como pode ser visto no diagrama de Pareto - Análise de ocorrências (Figura 7.5), após três semanas de análise, o tapete transportador parou durante 20 horas devido ao raspador, 9 horas devido à emenda danificada e 4 horas devido à correia desalinhada

(um total de 33 horas). Caso se tivesse só em conta estas paragens no período de 3 semanas de observação, o tapete transportador opera cerca de 68,6% do tempo de operação previsto.

A implementação da TPM permitirá alcançar um maior ganho na autonomia dos operadores, áreas mais limpas, arrumadas e organizadas em torno da área do tapete transportador, através da aplicação da metodologia 5S. Com o aumento da autonomia dos operadores, após receberem a formação e treino necessários passarão a ter uma melhor compreensão da sua posição no trabalho e das máquinas e equipamentos que operam, permitindo-lhes realizar pequenas manutenções, limpezas, apertos, inspeções e até a identificação de anomalias e a sua resolução.

Por outro lado, a manutenção autónoma contribui para que a monitorização em tempo real possa ser realizada ininterruptamente. Com o operador consciente desta mais-valia, terá também a função de inspecionar todos os sensores que fazem parte do tapete transportador, para verificar se têm algum problema, ou se necessitam de limpeza. Inclusive, podem ser identificados novos parâmetros a monitorizar que podem ser úteis para melhorar a preparação e planeamento da manutenção, bem como o desempenho do equipamento e, conseqüentemente, aumentar a sua disponibilidade.

Com a inclusão do plano de manutenção autónoma, bem como a melhoria do plano de manutenção, foi monitorizado o funcionamento do tapete transportador. Por este acompanhamento, foi possível determinar algumas melhorias e comparar com as primeiras semanas observação.

Pela Figura 8.2 e Figura 8.3 pode-se observar o resumo das várias ocorrências e o número total de horas em que o tapete transportador esteve parado. Relativamente às 3 semanas de observação, a primeira semana o mesmo esteve parado 8 vezes, na segunda semana 9 vezes e na terceira semana 8 vezes, totalizando 25 horas.

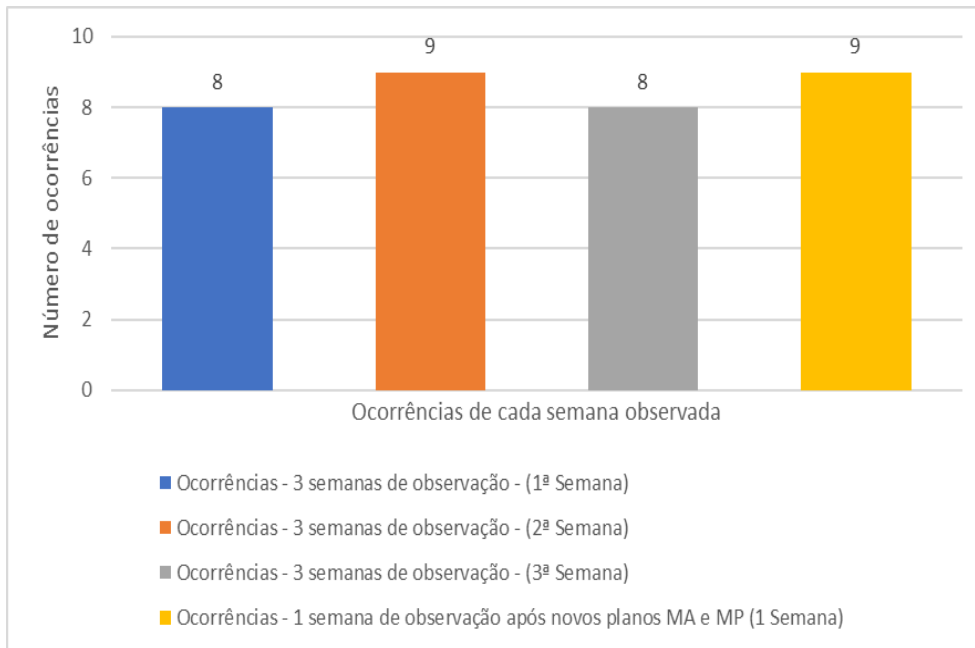


Figura 8.2 – Comparação das ocorrências nas semanas de observação.

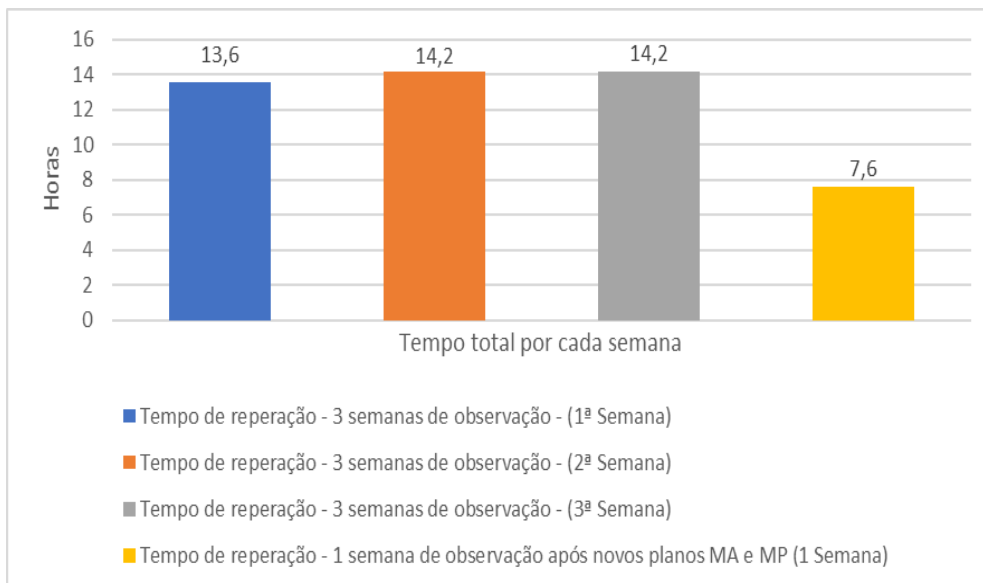


Figura 8.3 – Distribuição das horas de reparação por semana de observação.

Após a implementação do plano de manutenção autônoma e a melhoria do plano de manutenção preventiva, num período de uma semana, o tapete transportador esteve parado 7,6h (com 9 ocorrências), tendo uma redução em torno dos 44-49% relativamente às primeiras 3 semanas de observação (Figura 8.4).

Conforme a Figura 8.4, durante a semana de observação após a implementação dos pilares: MA e MP e, considerando o mesmo regime de funcionamento da fábrica (3 turnos de 7 horas e 5 dias úteis), o tapete transportador operou 92,8% do tempo

previsto (97,4 horas). Assim, a sua disponibilidade aumentou em cerca de 7%, quando comparado às três primeiras semanas de observação. Quanto ao tempo médio de reparação, houve uma redução de cerca de 50%. Esta análise pode ser influenciada pelo tempo de observação, bem como pela adaptação dos operadores na realização das suas novas tarefas (Figura 8.4).

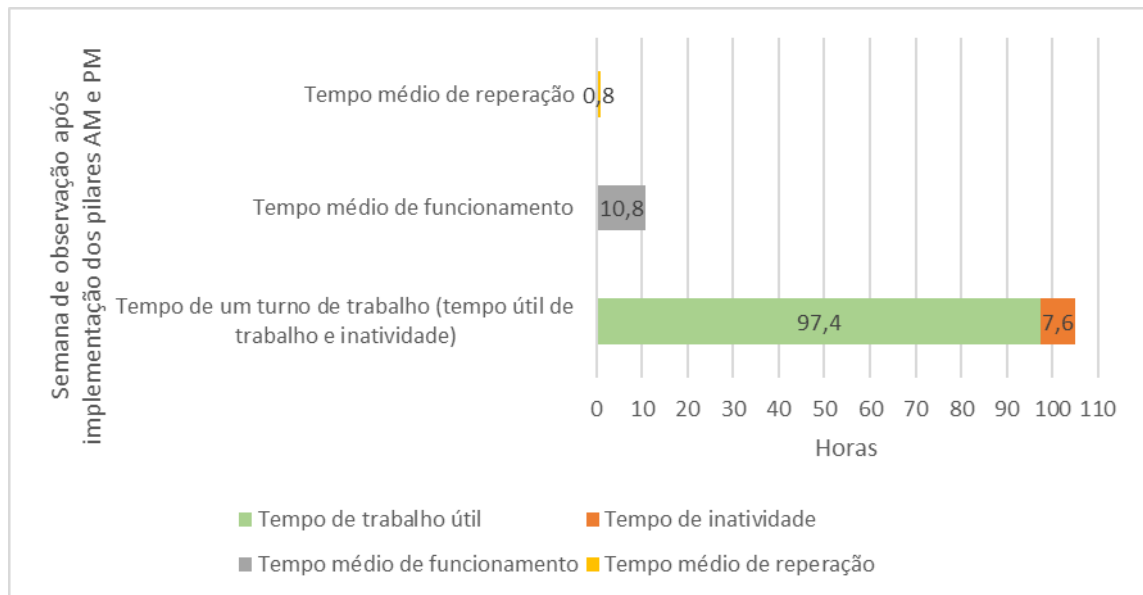


Figura 8.4 – Tempo útil de trabalho, tempo de inatividade, tempo médio de operação e reparação após os pilares MA e MP.

Tanto o plano de Manutenção Autónoma como o plano de manutenção do tapete transportador até ao momento são preparados manualmente. Espera-se que, num futuro próximo, seja adicionada uma função ao sistema de gestão da manutenção, para que possa ser emitida e acionada quer em suporte físico ou através de um dispositivo móvel.

Com o aperfeiçoamento das competências dos operadores ao longo do tempo, bem como o aumento da Formação e Treino que lhes é proporcionada, mas também aos técnicos de manutenção da empresa, espera-se que haja uma melhoria mais significativa.

Os fatores que podem influenciar o sucesso desta metodologia são o empenho e a vontade da gestão de topo em implementá-la; trabalho em equipa, o envolvimento de todos os elementos da empresa, ou seja, quadros superiores, técnicos de manutenção e operadores; a mudança de paradigma, por vezes afetada pela resistência à mudança; a falta de comunicação, planeamento e preparação em todas as etapas; a falta de acompanhamento dos resultados obtidos em cada fase de implementação e no final da

mesma, bem como da Formação e Treino proporcionada a todos os elementos que estarão envolvidos.

A Figura 8.5, mostra os dados recolhidos recentemente através do sistema de monitorização. Após a recolha de dados, estes serão processados e armazenados através do site do ThingSpeak, representados num gráfico. A Figura 8.5 mostra a representação do Tempo de Funcionamento e de Inatividade, onde zero representa o momento em que o tapete transportador é interrompido e um representa o tempo de boa operação. Assim, a Figura 8.5 permite verificar que o tapete transportador parou 2 vezes no dia 26 de julho, entre as 15h e as 20h, e que no dia 27 de julho, parou uma vez.

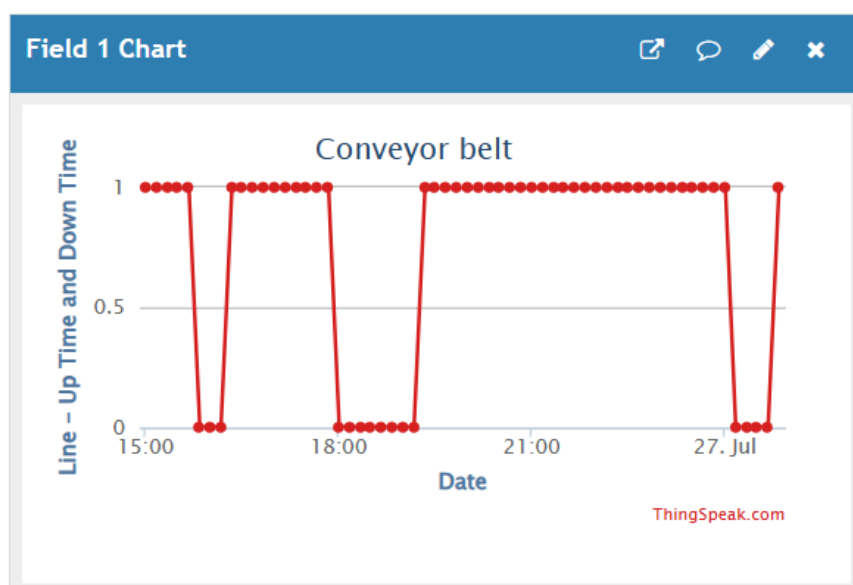


Figura 8.5 – Representação do Tempo de Funcionamento e de Inatividade.

Face às ineficiências do método tradicional da aquisição dos dados e registo dos mesmos concernentes às atividades da gestão da manutenção, torna-se importante recolher estes dados de forma automática e sem necessidade de tratamento posterior. O modelo desenvolvido se for aplicado corretamente pode contribuir para melhorar as condições de utilização e disponibilidade dos tapetes transportadores, assim como dos equipamentos industriais em geral. Pois, permite por meio do conhecimento real das condições de funcionamento adequar os planos de manutenção e inspeção de modo a aumentar a vida útil do tapete transportador, como nos equipamentos industriais em geral. Também permite reduzir o tempo efetivo desde a aquisição e a respetiva análise dos dados face aos métodos tradicionais de recolha de dados, como adequar as intervenções da manutenção (melhorar os tempos e intervalos das intervenções de manutenção), o que contribui para alcançar uma redução das intervenções de carácter

corretivas, reduzindo falhas e otimizando resultados, possibilitando reduzir os custos da manutenção, e por outro lado aumentar a disponibilidade do tapete transportador. Também permite melhorar a qualidade da manutenção. Por último, destaca-se que a consulta de dados é flexível, através de qualquer dispositivo com acesso à internet, e a interação quando devidamente implementada e programada é simples e intuitiva, não havendo assim a necessidade de ter constantemente técnicos altamente qualificados para proceder à recolha, tratamento, respetivo cálculo e análise dos dados de modo a identificar as estratégias mais adequadas para o tapete transportador, o que permite reduzir o pessoal de serviço e os especialistas durante o horário de funcionamento ou possibilitar que estes se focalizem noutras tarefas de maior valor acrescentado. Tais melhorias vêm de encontro aos objetivos da área da manutenção, contribuindo para uma gestão melhorada a um custo reduzido de modo a possibilitar um aumento nos lucros das empresas, assim como contribuir para que estas possam aumentar a sua competitividade e longevidade nos mercados atuais.

Constatou-se que a implementação deste modelo, embora tenha sido até agora o sistema de monitorização implementado, este veio melhorar o desempenho do tapete transportador, não ficando este muito tempo em espera quando ocorre alguma falha, aumentando a sua disponibilidade. Este aumento advém não só da possibilidade de comunicação mais célere por parte dos operadores por meio do envio de um *e-mail* para a área da manutenção, mas também como as ações de formação e treino que a empresa está a facultar aos seus colaboradores da área onde opera este equipamento, no sentido de introduzir a curto prazo o TPM.

8.2. Limitações

Apesar do teste de campo e acompanhamento do funcionamento do modelo proposto durante as semanas seguintes, e verificar que este teve um impacto positivo e prometedora, o estudo apresenta algumas limitações.

O modelo, tanto quanto se sabe, só foi implementado ao tapete transportador, o que limita a verificação da sua aplicabilidade e operacionalidade, visto que ainda só foi aplicado a este tipo de equipamentos à área industrial. Assim, este, deve ser testado em ambiente de maior complexidade, onde se possa integrar o modelo a um conjunto significativo de equipamentos e verificar possíveis limitações.

Por outro lado, e embora o modelo seja de baixo custo e atrativo, e que venha a contribuir para que as micro e pequenas empresas possam também ter acesso às novas tecnologias e metodologias que as permitem obter melhorias na área da manutenção,

produção, bem como dar uma resposta mais eficiente e eficaz no mercado global, o desempenho deste pode ser influenciado no que concerne à distância máxima entre os vários dispositivos que compõem o sistema. Este constrangimento deve-se ao facto de que nem todos os dispositivos possuem o mesmo alcance de comunicação. Esta limitação pode ser contornada através da análise do meio envolvente e da distância necessária de comunicação. Seguidamente, seleccionar os dispositivos e o respetivo protocolo de comunicação de acordo com as necessidades, contudo poderá influenciar o custo final.

Outra das limitações decorre do facto da inserção de novas tecnologias e plataformas como o ThingSpeak no seio das empresas, o que pode propiciar a ocorrência de problemas relacionados com a gestão de grandes volumes de dados e a proteção dos dados, por possíveis ataques informáticos. Apesar do ThingSpeak ser comumente utilizada e oferecer versões pagas e gratuitas, segundo Vogel *et al.* (2020), De Nardis *et al.* (2022) e Abdelghany *et al.* (2023), à medida que o fluxo de informação aumenta a sua utilização pode ficar comprometida.

Outra limitação diz respeito à cibersegurança, conforme referido. Portanto deve-se num curto espaço de tempo, estudar a possibilidade de aumentar o sistema de segurança no modelo proposto. A grande diversidade de plataformas e protocolos ligados à IoT pode contribuir para agilizar a vida das empresas, através das tecnologias habilitadoras da I4.0, no entanto a cibersegurança é muitas vezes negligenciada. Esse descuido com arquiteturas de segurança básicas e imaturas, pode comprometer todos os dados recolhidos e armazenados, assim como programas, computadores, *tablets*, redes e dados, devido à vulnerabilidade a ataques, tornando necessário criar contramedidas para proteger suas soluções da IoT. Embora seja utilizado uma rede de internet própria, que permite o acesso a vários utilizadores, pode na mesma comprometer eventuais problemas de segurança (Andrioiaia, 2022; Shinde *et al.*, 2022; Essa *et al.*, 2023).

Desta forma, e de acordo com Kiss *et al.* (2019), Raimundo & Rosário (2022) e Aldhyani & Alkahtani (2023), aconselha-se num curto período de tempo, estudar a possibilidade de aumentar um sistema de segurança no modelo proposto. Esta melhoria pode ser conseguida através de: *Blockchain*, utilização de criptografia na comunicação, identificação de dispositivos, aplicações e utilizadores, controlo de acessos, entre outras medidas que visam garantir a integridade do sistema.

Outra limitação ao uso de novas tecnologias é a existência de instalações industriais com alto ruído eletromagnético. Wilson *et al.* (2020), Herrero *et al.* (2021) e Kong *et al.* (2022) salientam que o ruído eletromagnético pode condicionar o uso do BLE, uma vez que pode causar perturbações temporárias e perda de dados, falhas do sistema e até mesmo perda de vidas. As estratégias de atenuação da interferência eletromagnética (IE) podem ser utilizadas para evitar o acoplamento de alta frequência a sinais sensíveis, tais como o aumento da distância entre os vestígios ou a adição de um escudo IE.

Por último, ainda se destaca que para além da implementação da arquitetura que compõe o sistema de monitorização, existe a necessidade da implementação da metodologia TPM, que pode evidenciar alguns desafios dentro da empresa. Pois, esta metodologia de gestão requer muita dedicação quer por parte da gestão de topo como pelos técnicos de manutenção em facultar formação e treino aos seus operadores, de modo que estes ao longo do tempo venham a ter um melhor desempenho, autonomia para realizar pequenas tarefas de manutenção de forma autónoma.

8.3. Nota Conclusiva

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados da implementação do sistema desenvolvido num tapete transportador.

A empresa trabalha 5 dias por semana, com 3 turnos de 7 horas (já com os descontos para refeições e outras pausas para os trabalhadores). Durante 3 semanas, o tapete transportador foi acompanhado de modo a verificar o seu funcionamento e possíveis falhas. Das 105 horas do tempo de trabalho/observação, verificou-se que este na primeira semana esteve parado em média cerca de 11,4 horas, na segunda semana cerca de 14,0 horas e na terceira semana 11,4 horas. O tempo médio de reparação durante 3 semanas é de 1,7 horas por intervenção.

Após a implementação do plano de manutenção autónoma e melhoria do plano de manutenção preventiva, foi possível observar algumas melhorias no tapete transportador. Na semana de observação, após acerto e aplicação dos planos de manutenção, este esteve parado 7,6 horas (passando das 42 horas iniciais para 7,6 horas), apresentando um funcionamento em torno dos 92,8% do tempo previsto, tendo a disponibilidade aumentado em 7% e uma redução de 50% do tempo médio de reparação.

Também foram apresentadas as limitações encontradas na implementação do modelo desenvolvido. Este só foi aplicado a este tipo de equipamentos e área industrial. O desempenho do modelo pode ser influenciado no que concerne à distância máxima entre os vários dispositivos que compõem o sistema. Por outro lado, a inserção de novas tecnologias e plataformas como o ThingSpeak no seio das empresas, pode levar a problemas relacionados com a gestão de grandes volumes de dados e a proteção dos dados, por possíveis ataques informáticos. O modelo também pode apresentar algumas limitações quando aplicado em instalações industriais com alto ruído eletromagnético. Por último, a implementação da metodologia TPM pode evidenciar alguns desafios no seio das empresas.

Apesar das limitações, pode-se concluir que a implementação do modelo ao tapete transportador contribuiu para melhorar o seu desempenho e disponibilidade. Estes benefícios são fruto da visualização dos indicadores por parte de todos os envolventes no chão de fábrica e da comunicação mais célere por parte destes, assim como das ações de formação e treino que a empresa está a facultar aos seus colaboradores da área onde opera este equipamento, no sentido de enraizar e difundir o TPM nas restantes áreas da empresa.

Capítulo 9

Conclusões

Após o desenvolvimento das várias fases da presente tese, com este capítulo pretende-se encerrar esta investigação, mediante a elaboração do presente capítulo conclusivo. Também se apresentam as sugestões e propostas de trabalhos futuros.

9.1. Conclusões

A presente tese teve como o principal foco a criação de um modelo que combina os conceitos: Manutenção, FL e a I4.0 para melhorar a gestão da manutenção e todas as atividades inerentes à mesma. A seguir descrevem-se as conclusões alcançadas no contexto da presente tese.

Para levar a cabo o objetivo principal da presente tese, foi realizada uma RSL quanto aos conceitos: Manutenção, FL e I4.0 (capítulo 5). Este estudo permitiu entender melhor a importância de cada um dos conceitos analisados nesta investigação, adquirir e consolidar informação no que diz respeito a cada um destes, assim como responder às questões de pesquisa. Pelo estudo realizado entre 2015 – 2021, conseguiu-se apurar que existe um vasto leque de indústrias a utilizar estes conceitos passando pela indústria têxtil, aeroespacial, até à indústria automóvel, em que esta última pelo estudo representa cerca de 14,7%.

Quanto às metodologias e tecnologias mais utilizadas quando aplicados os conceitos em simultâneo ou parcialmente para melhorar a área da manutenção, foi possível verificar um vasto leque. Quando o objetivo é incrementar a I4.0 no seio das empresas podem-se destacar os sensores, *gateway*, *Internet of Things*, Inteligência Artificial, Realidade Aumentada, *Big Data*, *Cloud Computing*, *Internet of Service (IoS)*, entre outras tecnologias e plataformas associadas a este conceito. Relativamente à FL, as ferramentas mais utilizadas são: 5S, TPM, VSM, *Kaizen*, *Kanban*, SMED, Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa, *Brainstorming*, Gestão visual, *Standard Work*, entre outras.

Conseguiu-se apurar ainda, que apesar de haver um elevado interesse na investigação e desenvolvimento de modelos integrando os conceitos em estudo, quando se trata de integrar os três conceitos, pelo estudo realizado e até ao presente momento, é limitado, não havendo desde quanto se saiba um modelo que combine estes conceitos para

monitorizar alguns dos indicadores mais importantes para a gestão da manutenção, assim como associar as tecnologias facilitadoras da I4.0 à FL, mais concretamente, ao TPM, verificando-se assim a necessidade de continuar a ser explorado.

Ficou evidente que a maioria dos modelos encontrados se destinam à monitorização dos parâmetros de condição das máquinas e equipamentos, e não para realizar a monitorização de outros parâmetros que também facilitam e promovem a melhoria da gestão da manutenção.

Pela análise dos vários artigos enumerados na presente tese, a interação quer da FL quer da I4.0, quando introduzida de forma correta na área da Manutenção, assim como nas restantes áreas das empresas, é benéfica e pode resultar num aumento da satisfação dos clientes, competitividade, qualidade e lucro. Por outro lado, também permite a eliminação ou redução de desperdícios, assim como a redução de custos, tempos, entre outros fatores vitais para que as empresas possam explorar e transformar em vantagens competitivas de modo a manterem no mercado cada vez mais global e volátil.

O modelo apresentado teve em conta que este deverá ser de baixo custo e flexível, de fácil e rápida instalação e de utilização simples, que possa ser utilizado quer pelos operadores, técnicos de manutenção assim como os responsáveis por esta área. Este também deve possibilitar a comunicação entre as máquinas e equipamentos recentes e mais antigos de uma forma não intrusiva. Quanto ao sistema de monitorização associado ao modelo, baseou-se sobretudo na arquitetura que compõe o sistema de monitorização proposta por Magadán *et al.* (2020). Este, apesar de ter sido projetado para a monitorização dos parâmetros da gestão da manutenção e da área produtiva, pela sua versatilidade, pode ser adaptado para monitorizar parâmetros de condição das máquinas e equipamentos, ou qualquer outra variável e em qualquer contexto industrial, através da devida escolha e modificação dos sensores, *softwares* e respetiva programação.

A introdução da FL na manutenção vem contribuir para melhorar este departamento que é parte integrante e fundamental no processo produtivo de qualquer indústria, contribuindo para melhorar consideravelmente o desempenho das atividades da manutenção, bem como na qualidade das intervenções a esta associadas. Os conceitos, quer sejam aplicados em separado, ou de forma combinada, são benéficos quer para a manutenção, produção, assim como para as empresas em geral, possibilitando a estas alcançar os objetivos delineados e a serem mais competitivas. A I4.0 traz consigo significativas vantagens para as empresas, assim como para a área da manutenção, já

que estas novas contribuições facilitam os controlos e acessos remotos, assim como a automação dos processos e dispositivos.

De modo a testar e validar o modelo, este foi implementado a um tapete transportador. Do estudo de caso salienta-se que o modelo atende às necessidades de melhorar a gestão da manutenção e do sistema produtivo. Quando instalado, este garante a recolha dos dados em tempo real, ininterruptamente.

Analisando as três semanas anteriores à implementação do TPM, o tapete transportador apresentava uma disponibilidade média de 86,7%. O tempo médio de operação durante as três semanas foi de 11 horas. O tempo médio das reparações de 1,7 horas, sobrecarregando os serviços de manutenção. Após a implementação do TPM, mais especificamente, a implementação dos pilares: MA e MP, obteve-se uma melhoria. O tempo total de operação durante uma semana foi de 97,4 horas, o que representa uma disponibilidade de 92,8%. Comparativamente às três primeiras semanas de observação, verificou-se um aumento do número de horas de funcionamento do tapete transportador em cerca de 7%. Uma melhoria mais significativa ocorreu no tempo médio de reparação, em que em média era realizado em 1,7 h, e, atualmente são necessárias 0,8 horas (48 min), o que representa uma redução de 53%. Este ganho está relacionado com algumas das tarefas a realizar pelos operadores após a sua formação, bem como com a disponibilização de um plano de MA adequado ao contexto operacional. Além disso, foram reduzidas as pequenas paragens por acúmulo de matéria-prima ou outras irregularidades que ocorriam com frequência. Ressalta-se que para a MA seja bem implementada e tenha seus efeitos, deve haver um bom apoio tanto da gestão de topo como da área de manutenção. Sempre que se justifique, deverá ser ministrada formação para atualização de conhecimentos para que os operadores adquiram novas competências no âmbito de uma filosofia de melhoria contínua.

Não dependendo tempo na aquisição dos dados, o seu tratamento e análise, facilitado por intermédio do sistema de monitorização implementado, os responsáveis da manutenção podem aceder a todos os dados necessários em tempo real, fazendo com que o tempo de resposta para cada máquina e equipamento seja mais adequado e oportuno.

Conforme indicado anteriormente, o modelo possui uma enorme versatilidade que visa a monitorização em tempo real os ativos do sistema produtivo, solucionando assim a má aquisição dos dados. Solução esta juntamente com o aumento do conhecimento por parte dos operadores que operam no tapete transportador e a obtenção dos dados em

tempo real, proporcionará um melhor desempenho da manutenção, melhorando os tempos de resposta e de reparação, assim como no planeamento destas, e no contexto do sistema produtivo, maximizando os tempos de produção. Ou seja, os colaboradores são a chave do sucesso da empresa. A sua criatividade continua aliada às suas competências técnicas e comportamentais, reforçadas pela partilha de conhecimento e experiências criam condições excelentes para a contínua e ininterrupta persecução dos objetivos “Zero Falhas”, “Zero defeitos”, “Zero desperdícios”, produzindo produtos de excelência, com elevada qualidade a um custo reduzido, que superam as expectativas dos clientes atingindo a total satisfação.

Constatou-se que a implementação deste modelo, junto com a consciencialização e participação de todos os elementos que operam na área envolvente ao tapete transportador, trouxe inúmeros benefícios, como: o aumento da disponibilidade, melhor conhecimento e desempenho dos colaboradores, intervenções e plano de manutenção mais ajustado à realidade diária de operação do tapete transportador, melhorando os tempos de paragens programadas, entre outros benefícios.

Os resultados mostram que o modelo proposto é uma ferramenta com mais-valias para as empresas, já que apoia a tomada de decisão por parte dos responsáveis da manutenção, parte integrante e cada vez mais vital para a sobrevivência das empresas atualmente. Com base na análise do histórico de manutenção, conjugada com os dados de monitorização contínua, é possível prever claramente ações futuras, principal objetivo do sistema de controlo apresentado, através da seleção e utilização de parâmetros específicos da gestão da manutenção.

9.2. Sugestões de Pesquisa e Trabalhos Futuros

Levando em consideração todo o cenário atual da empresa em questão, sugere-se que os pilares da metodologia TPM sejam evoluídos no dia-a-dia, e adotado nas restantes áreas da empresa, uma vez que o TPM pelas suas características é capaz de envolver todas as áreas da empresa e melhorar os resultados em diferentes aspetos quantitativos e qualitativos.

Para trabalhos futuros sugere-se ainda a implementação do modelo em outras áreas industriais de modo a ter a perceção das condicionantes da sua implementação em outras áreas, e assim poder evidenciar possíveis outras lacunas de modo a ser aprimorado.

Sugere-se ainda que estudos futuros devem englobar uma solução segura de partilha de informação, ou seja, melhorar a segurança do sistema, através de sistemas de controlo e aquisição de dados, com a utilização adequada de protocolos de comunicação seguros, sistemas de controlo de acesso, de modo a tornar o sistema proposto mais fiável e mais seguro, relativamente a possíveis ameaças de segurança.

Por último, seria de extrema importância realizar estudos com uma outra das necessidades atuais, a gestão ambiental. Este tema relevante não pode ser esquecido, quer seja pelas empresas em geral, mas também na área da manutenção. Deste modo, estudos ligados ao incremento de um novo conceito, em torno da gestão ambiental no seio da manutenção juntamente com a FL e as tecnologias da I4.0, podem revelar-se úteis para melhorar vários aspetos como a sustentabilidade ambiental, social e económica, permitindo também as empresas alcançarem novos níveis e patamares de competitividade, assim como novas oportunidades de negócio.

Referências

- Abbas, M., & Shafiee, M. (2020). An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. *Marine Structures*, 71, 102718. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102718>.
- Abdelghany, E. S., Farghaly, M. B., Almalki, M. M., Sarhan, H. H., & Essa, M. E. S. M. (2023). Machine learning and iot trends for intelligent prediction of aircraft wing anti-icing system temperature. *Aerospace*, 10(8), 676. doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace10080676>.
- Abidi, M. H., Mohammed, M. K., & Alkhalefah, H. (2022). Predictive maintenance planning for industry 4.0 using machine learning for sustainable manufacturing. *Sustainability*, 14(6), 3387. doi: <https://doi.org/10.3390/su14063387>.
- Abreu, A., Calado, J., & Requeijo, J. (2016). Buildings lean maintenance implementation model. *Open Engineering*, 6(1). doi: <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0055>.
- Aceto, G., Persico, V., & Pescapé, A. (2019). A survey on information and communication technologies for industry 4.0: State-of-the-art, taxonomies, perspectives, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3467-3501. doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2938259>.
- Aceto, G., Persico, V., & Pescapé, A. (2020). Industry 4.0 and health: Internet of things, big data, and cloud computing for healthcare 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 18, 100129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100129>.
- Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah Karganroudi, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., & Adda, M. (2022). On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. *Applied Sciences*, 12(16), 8081. doi: <https://doi.org/10.3390/app12168081>.
- Agustiady, T. K., & Cudney, E. A. (2018). Total productive maintenance. *Total Quality Management & Business Excellence*, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1438843>.

Aheleroff, S., Xu, X., Lu, Y., Aristizabal, M., Velásquez, J. P., Joa, B., & Valencia, Y. (2020). IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study. *Advanced engineering informatics*, 43, 101043. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101043>.

Ahmed, U., Carpitella, S., Certa, A., & Izquierdo, J. (2023). A Feasible Framework for Maintenance Digitalization. *Processes*, 11(2), 558. doi: <https://doi.org/10.3390/pr11020558>.

Alarcón, M., Martínez-García, F. M., & de León Hijes, F. C. G. (2021). Energy and maintenance management systems in the context of industry 4.0. Implementation in a real case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110841. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110841>.

Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering science and technology, an international journal*, 22(3), 899-919. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>.

Alcácer, V., Rodrigues, J., Carvalho, H., & Cruz-Machado, V. (2022). Industry 4.0 maturity follow-up inside an internal value chain: a case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-12. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08476-3>.

Aldhyani, T. H., & Alkahtani, H. (2023). Cyber Security for Detecting Distributed Denial of Service Attacks in Agriculture 4.0: Deep Learning Model. *Mathematics*, 11(1), 233. doi: <https://doi.org/10.3390/math11010233>.

Algabroun, H., Bokrantz, J., Al-Najjar, B., & Skoogh, A. (2020). Development of digitalised maintenance—a concept. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(2), 367-390. doi: <https://doi.org/10.1108/JQME-04-2019-0039>.

Ali, A. Y. (2019). Application of total productive maintenance in service organization. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 8(2), 176-186. doi: <https://doi.org/10.22105/riej.2019.170507.1076>.

Al-Samarraie, H., & Hurmuzan, S. (2018). A review of brainstorming techniques in higher education. *Thinking Skills and Creativity*, 27, 78-91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2017.12.002>.

Amicabile da Matta, G., de Carvalho Alves, M., Coimbra de Oliveira, N., Bastos da Silva, V. D., & de Stefano, E. (2023). A tecnologia e a Indústria 4.0 na engenharia de produção. *GeSec: Revista de Gestao e Secretariado*, 14(4). doi: <https://orcid.org/0000-0002-5955-1048>.

Amrani, M.A., Alhomdi, M., Aswaidy M, B., Ghaleb, A.M., Al-Qubati, M. and Shameeri, M. (2022). Implementing an integrated maintenance management system for monitoring production lines: a case study for biscuit industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(1), 180-196. doi: <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2020-0049>.

Andrioaia, D. A. (2022). Cyber security analysis of iot devices transmitting data in the thingspeak platform cloud. *Journal of Engineering Studies and Research*, 28(3), 29-33. doi: <https://doi.org/10.29081/jesr.v28i3.003>.

Anh, D. T., Dąbrowski, K., & Skrzypek, K. (2018). The predictive maintenance concept in the maintenance department of the “Industry 4.0” production enterprise. *Foundations of Management*, 10(1), 283-292. doi: <http://dx.doi.org/10.2478/fman-2018-0022>.

Ante, G., Facchini, F., Mossa, G., & Digiesi, S. (2018). Developing a key performance indicators tree for lean and smart production systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 13-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.227>.

Antosz, K., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Paśko, Ł., Zhang, C., & Wang, S. (2021). Application of machine learning and rough set theory in lean maintenance decision support system development. *Eksploatacja i Niezawodność*, 23(4), 695-708. doi: <http://doi.org/10.17531/ein.2021.4.12>.

Arrascue-Hernandez, G., Cabrera-Brusil, J., Chavez-Soriano, P., Raymundo-Ibañez, C., & Perez, M. (2020). Lean maintenance model based on change management allowing the reduction of delays in the production line of textile SMEs in Peru. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 796(1), 012017. doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/796/1/012017>.

Arslankaya, S., & Atay, H. (2015). Maintenance management and lean manufacturing practices in a firm which produces dairy products. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 207, 214-224. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.10.090>.

Ashjaei, M. & Bengtsson, M. (2017). Enhancing Smart Maintenance Management Using Fog Computing Thecnology, *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1561-1565. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8290155>.

Assad, F., Konstantinov, S., Nureldin, H., Waseem, M., Rushforth, E., Ahmad, B., & Harrison, R. (2021). Maintenance and digital health control in smart manufacturing based on condition monitoring. *Procedia CIRP*, 97, 142-147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.216>.

Association Française de Normalisation (AFNOR) (2016). Norme AFNOR FDX 60 – 000, 2016.

Aven, T., & Zio, E. (2021). Globalization and global risk: How risk analysis needs to be enhanced to be effective in confronting current threats. *Reliability Engineering & System Safety*, 205, 107270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107270>.

Azriadi, E. (2021). Implementing Decision-Making Grid Model to Improve Maintenance Strategies in Oil Palm Industries. *Journal of Engineering Science and Technology Management (JES-TM)*, 1(2), 37-46. doi: <https://doi.org/10.31004/jestm.v1i2.51>.

Baba, A. (2020). A new design of a flying robot, with advanced computer vision techniques to perform self-maintenance of smart grids. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.07.009>.

Baluch, N. H., Abdullah, C. S., & Mohtar, S. (2012). TPM and lean maintenance-A critical review. *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business (IJCRB)*, 4(2), 850-857.

Barraza-Barraza, D., Limón-Robles, J., & Beruvides, M. G. (2014). Maintenance-related costs in maintenance management. In *ASEM 2014 International Annual Conference*, Virginia Beach, DOI (Vol. 10, No. 2.1, pp. 1894-6568).

Biedermann, H. & Kinz, A. (2019). Lean Smart Maintenance—Value Adding, Flexible, and Intelligent Asset Management. *Berg Huettenmaenn Monatsheft* 164, 13–18. doi: <https://doi.org/10.1007/s00501-018-0805-x>.

Birkinbine, B. J. (2020). Political economy of peer production. *The handbook of peer production*, 33-43. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119537151.ch3>.

Blanco-Novoa, O., Fernandez-Carames, T. M., Fraga-Lamas, P., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A practical evaluation of commercial industrial augmented reality systems in an industry 4.0 shipyard. *Ieee Access*, 6, 8201-8218. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2802699>.

Bongomin, O., Gilibrays Ocen, G., Oyondi Nganyi, E., Musinguzi, A., & Omara, T. (2020). Exponential disruptive technologies and the required skills of industry 4.0. *Journal of Engineering*, 2020, 1-17. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/4280156>.

Borjalilu, N., & Ghambari, M. (2018). Optimal maintenance strategy selection based on a fuzzy analytical network process: A case study on a 5-MW powerhouse. *International journal of engineering business management*, 10, 1847979018776172. doi: <https://doi.org/10.1177/1847979018776172>.

Boubiche, S., Boubiche, D. E., Bilami, A., & Toral-Cruz, H. (2018). Big data challenges and data aggregation strategies in wireless sensor networks. *IEEE access*, 6, 20558-20571. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2821445>.

Bousdekis, A., Lepenioti, K., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2019). Decision making in predictive maintenance: literature review and research agenda for industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 607-612. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.226>.

Bulatović, M. & Đurović, D. (2014). Lean concept in the maintenance. *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, 18(1), 135-138.

Bumblauskas, D., Gemmill, D., Igou, A., & Anzengruber, J. (2017). Smart Maintenance Decision Support Systems (SMDSS) based on corporate big data analytics. *Expert systems with applications*, 90, 303-317. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.08.025>.

Burawat, P. (2019). Productivity improvement of highway engineering industry by implementation of lean six sigma, tpm, ecrs, and 5s: a case study of aaa Co., Ltd. *Humanities & Social Sciences Reviews*, 7(5), 83-92. doi: <https://doi.org/10.18510/hssr.2019.7511>.

Burns, T., Cosgrove, J., & Doyle, F. (2019). A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 38, 646-653. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.083>.

Cabral, J. P. S. (2006). *Organização e Gestão da Manutenção* (5a ed.). Coimbra: Almedina.

Cabrita, C. P., & Cardoso, A. M. (2015). Conceitos e definições de falha e avaria nas normas portuguesas de manutenção NP EN 13306: 2007 e NP EN 15341: 2009. *Revista de Manutenção*, 125(2), 4-9.

Cañas, H., Mula, J., Díaz-Madroñero, M., & Campuzano-Bolarín, F. (2021). Implementing industry 4.0 principles. *Computers & industrial engineering*, 158, 107379. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107379>.

Carvalho, M., & Navas, H. V. (2019). Aplicação da Filosofia *Lean* na Gestão da Manutenção de uma Empresa de Reparação Naval. *Livro de Atas do X Encontro de Investigadores da Qualidade: Qualidade, Investigação e Desenvolvimento*, 157-172.

Carvalho, O. S., dos Santos, J. F., da Silva, R. S., Geribello, R. S., & dos Santos Amarante, M. (2019). Manutenção autônoma. *Revista Pesquisa e Ação*, 5(4), 146-156.

Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516-526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>.

Chakraborty, A. (2016). Importance of PDCA cycle for SMEs. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 3(5), 30-34.

Chan, C. O., & Tay, H. L. (2018). Combining lean tools application in kaizen: a field study on the printing industry. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 67(1), 45-65. doi: <https://doi.org/10.1108/IJPPM-09-2016-0197>.

Chen, Q., Heydari, B., & Moghaddam, M. (2021). Leveraging task modularity in reinforcement learning for adaptable industry 4.0 automation. *Journal of Mechanical Design*, 143(7), 071701. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4049531>.

- Chintada, A & Umasankar V. (2022). Improvement of productivity by implementing occupational ergonomics. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 39(1), 59-72. doi: <https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1958936>.
- Chugh, R., Macht, S., & Hossain, R. (2022). Robotic Process Automation: a review of organizational grey literature. *International Journal of Information Systems and Project Management*, 10(1), 5-26.
- Clarke, G., Mulryan, G., & Liggan, P. (2010). Lean maintenance—A risk-based approach. *Pharmaceutical Engineering*, 30(5), 1-6.
- Coelho, T. M. S., de Souza, M. C. A., Costa, A. P. T., de Alencar, D. B., & Parente, R. S. (2020). Otimização do processo de manutenção com a modificação do duto de exaustão de uma ute da cidade de manaus. *South American Development Society Journal*, 6(18), 01. doi: <http://dx.doi.org/10.24325/issn.2446-5763.v6i18p1-19>.
- Coetzee, R., Van Dyk, L., & Van der Merwe, K. (2016). Lean implementation strategies: how are the Toyota Way principles addressed?. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(3), 79-91.
- Converso, G., Gallo, M., Murino, T., & Vespoli, S. (2023). Predicting Failure Probability in Industry 4.0 Production Systems: A Workload-Based Prognostic Model for Maintenance Planning. *Applied Sciences*, 13(3), 1938. doi: <https://doi.org/10.3390/app13031938>.
- Corbally, R. & Malekjafarian, A. (2021). Examining changes in bridge frequency due to damage using the contact-point response of a passing vehicle. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 6(3), 148-158. doi: <https://doi.org/10.1080/24705314.2021.1906088>.
- Cordeiro, G. (2019). Application of lean tools in the industrial maintenance sector. *Engevista* 21 (1), 1-13.
- Costello, O., Kent, M. D., & Kopacek, P. (2019). Cost-Oriented Maintenance Engineering: Case Study of an Irish Manufacturing Plant. *IFAC-PapersOnLine*, 52(25), 409-414. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.572>.

Culot, G., Fattori, F., Podrecca, M., & Sartor, M. (2019). Addressing industry 4.0 cybersecurity challenges. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3), 79-86. doi: <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2927559>.

Cusano, C., & Napoletano, P. (2017). Visual recognition of aircraft mechanical parts for smart maintenance. *Computers in Industry*, 86, 26-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.01.001>.

da Silva, M. A., Azevedo, F. G., & Ferreira, F. G. D. (2019). TPM e Manutenção Autônoma: Estudo de caso em uma empresa de pintura no ramo automotivo,” *Revista Eletrônica Estácio Recife*, 5(2), 1-10.

Da Silva, M. G. (2016). Jidoka: Conceitos e aplicação da automação em uma empresa da indústria eletrônica. *Revista Espacios*, 37(02).

Dănuț-Sorin, I. R., Opran, C. G., & Lamanna, G. (2020). Lean manufacturing 4.0 of polymeric injection molding products. *In Macromolecular Symposia*, 389(1), 1900109. doi: <https://doi.org/10.1002/masy.201900109>.

Dave, P. Y. (2020). The history of lean manufacturing by the view of Toyota-Ford. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 11(8), 1598-1602.

de Lima, A. G., & Pinto, G. S. (2019). Indústria 4.0: um novo paradigma para a indústria. *Revista Interface Tecnológica*, 16(2), 299-311.

De Nardis, L., Mohammadpour, A., Caso, G., Ali, U., & Di Benedetto, M. G. (2022). Internet of things platforms for academic Research and Development: A critical review. *Applied Sciences*, 12(4), 2172. doi: <https://doi.org/10.3390/app12042172>.

De Silva, N., Ranasinghe, M., & De Silva, C.R. (2012). Maintainability approach for lean maintenance. In S. Senaratne & Y.G. Sandanayake (Eds.). *Global challenges in construction industry*. Ceylon Institute of Builders, 100-109.

Deuse, J., Dombrowski, U., Nöhring, F., Mazarov, J., & Dix, Y. (2020). Systematic combination of Lean Management with digitalization to improve production systems on the example of Jidoka 4.0. *International Journal of Engineering Business Management*, 12, 1847979020951351. doi: <https://doi.org/10.1177/1847979020951351>.

- Di Bona, G., Cesarotti, V., Arcese, G., & Gallo, T. (2021). Implementation of Industry 4.0 technology: New opportunities and challenges for maintenance strategy. *Procedia Computer Science*, 180, 424-429. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.258>.
- Didelet, F. J. P & Sena, F. (2016). *Manutenção de Instalações Técnicas*, eengebook. ISBN: 978-989-723-140-7.
- Dikhanbayeva, D., Shaikholla, S., Suleiman, Z., & Turkyilmaz, A. (2020). Assessment of industry 4.0 maturity models by design principles. *Sustainability*, 12(23), 9927. doi: <https://doi.org/10.3390/su12239927>.
- Dobrzański, L. A. (2019). Role of materials design in maintenance engineering in the context of industry 4.0 idea. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 96(1). doi: <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0013.7932>.
- Dohale, V., Gunasekaran, A., Akarte, M. M., & Verma, P. (2022). 52 Years of manufacturing strategy: an evolutionary review of literature (1969–2021). *International journal of production research*, 60(2), 569-594. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1971788>.
- Dombrowski, U., Richter, T., & Krenkel, P. (2017). Interdependencies of Industrie 4.0 & lean production systems: A use cases analysis. *Procedia Manufacturing*, 11, 1061-1068. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.217>.
- Dunn, S. (2015). "Maintenance Terminology - Some Key Terms" [online]. Available: <https://www.plant-maintenance.com/terminology.shtml> [Accessed: 7/2/23]
- Duran, O., Capaldo, A., & Duran Acevedo, P. A. (2017). Lean maintenance applied to improve maintenance efficiency in thermoelectric power plants. *Energies*, 10(10), 1653. doi: <https://doi.org/10.3390/en10101653>.
- Ebeid, A. A., El-Khouly, I. A., & El-Sayed, A. E. (2016, December). Lean maintenance excellence in the container handling industry: A case study. In 2016 IEEE *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1646-1650. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEM.2016.7798156>.
- Ebrahimi, M., Baboli, A., & Rother, E. (2019). The evolution of world class manufacturing toward Industry 4.0: A case study in the automotive industry. *IFAC-Papersonline*, 52(10), 188-194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.021>.

Einabadi, B., Baboli, A., & Ebrahimi, M. (2019). Dynamic Predictive Maintenance in industry 4.0 based on real time information: Case study in automotive industries. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1069-1074. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.337>.

Epler, I., Sokolovic, V., Milenkov, M., & Bukvic, M. (2017). Application of lean tools for improved effectiveness in maintenance of technical systems for special purposes. *Eksploatacja i Niezawodność*, 19(4). doi: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.4.16>.

Essa, M. E. S. M., El-shafeey, A. M., Omar, A. H., Fathi, A. E., Maref, A. S. A. E., Lotfy, J. V. W., & El-Sayed, M. S. (2023). Reliable Integration of Neural Network and Internet of Things for Forecasting, Controlling, and Monitoring of Experimental Building Management System. *Sustainability*, 15(3), 2168. doi: <https://doi.org/10.3390/su15032168>.

Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F., & Zanin, G. (2014). Industrial maintenance policy development: A quantitative framework. *International Journal of Production Economics*, 147, 85-93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.08.018>.

Ferreira, C., Sá, J. C., Ferreira, L. P., Lopes, M. P., Pereira, T., & Silva, F. J. G. (2019). iLeanDMAIC—A methodology for implementing the lean tools. *Procedia Manufacturing*, 41, 1095-1102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.038>.

Ferreira, S., Silva, F. J. G., Casais, R. B., Pereira, M. T., & Ferreira, L. P. (2019). KPI development and obsolescence management in industrial maintenance. *Procedia Manufacturing*, 38, 1427-1435. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.145>.

Filho, A. D. M., Gomes da Silva, J., & Sarmanho de Oliveira Lima, M. (2019). Impact of Autonomous Maintenance on a PIM Production Line.” *International Journal for Innovation Education and Research*, 7(12), 385–398. doi: <https://doi.org/10.31686/ijier.Vol7.Iss12.2084>.

Fonseca-Junior, M., Holanda-Bezerra, U., Cabral-Leite, J., & Reyes-Carvajal, T. L. (2015). Maintenance management program through the implementation of predictive tools and TPM as a contribution to improving energy efficiency in power plants. *Dyna*, 82(194), 139-149. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n194.47642>.

Fraga-Lamas, P., Fernandez-Carames, T. M., Blanco-Novoa, O., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0

shipyard. *Ieee Access*, 6, 13358-13375. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326>.

Freitas, C. A., Silva, A. R., de Aguiar, D. S., da Silva, M. M., da Silva Cardoso, A., Martins, D. R., & de Arruda, A. C. S. (2020). A evolução da segurança no trabalho aplicada na manutenção industrial 4.0. *REMIPE-Revista de Micro e Pequenas Empresas e Empreendedorismo da Fatec Osasco*, 6(2), 229-251. doi: <https://doi.org/10.21574/remipe.v6i2.289>.

Frontoni, E., Rosetti, R., Paolanti, M., & Alves, A. C. (2020). HATS project for lean and smart global logistic: A shipping company case study. *Manufacturing Letters*, 23, 71-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.12.003>.

Gackowiec, P. (2019). General overview of maintenance strategies–concepts and approaches. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 2(1), 126-139.

Gaziero, C., & Cecconello, I. (2019). Simulação computacional do fluxo de valor: uma proposta de integração da Indústria 4.0 e lean production. *Scientia Cum Industria*, 7(2), 52-67.

Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of manufacturing technology management*, 29(6), 910-936. doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0057>.

Ghouat, M., Haddout, A., & Benhadou, M. (2021). Impact of industry 4.0 concept on the levers of Lean Manufacturing approach in manufacturing industries. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 18(1), 8523-8530. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.18.1.2021.11.0646>.

Gonçalves, C. D. F., Dias, J. A. M., & Machado, V. A. C. (2015). Multi-criteria decision methodology for selecting maintenance key performance indicators. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 10(3), 215-223. doi: <https://doi.org/10.1080/17509653.2014.954280>.

Gonzalez, E., Nanos, E. M., Seyr, H., Valdecabres, L., Yürüşen, N. Y., Smolka, U., ... & Melero, J. J. (2017). Key performance indicators for wind farm operation and maintenance. *Energy Procedia*, 137, 559-570. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.385>.

Gopalakrishnan, M., Subramaniyan, M., & Skoogh, A. (2022). Data-driven machine criticality assessment–maintenance decision support for increased productivity. *Production Planning & Control*, 33(1), 1-19. doi: <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1817601>.

Goshime, Y., Kitaw, D., & Jilcha, K. (2019). Lean manufacturing as a vehicle for improving productivity and customer satisfaction: A literature review on metals and engineering industries. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(2), 691-714. doi: <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2017-0063>.

Guo, W., Jiang, P., Xu, L., & Peng, G. (2019). Integration of value stream mapping with DMAIC for concurrent Lean-Kaizen: A case study on an air-conditioner assembly line. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2), 1687814019827115. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814019827115>.

Gupta, A. K., & Garg, R. K. (2012). OEE improvement by TPM implementation: a case study. *International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research*, 1(1), 115-124.

Gupta, P., & Vardhan, S. (2016). Optimizing OEE, productivity and production cost for improving sales volume in an automobile industry through TPM: a case study. *International Journal of Production Research*, 54(10), 2976-2988. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1145817>.

Gupta, S., Gupta, P., & Parida, A. (2017). Modeling lean maintenance metric using incidence matrix approach. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 8, 799-816. doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-017-0671-z>.

Hall, R., Schumacher, S., & Bildstein, A. (2022). Systematic Analysis of Industrie 4.0 Design Principles. *Procedia CIRP*, 107, 440-445. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.005>.

Hassan, M. N., Barakat, A. F., & Sobh, A. S. (2020, November). Effect of applying lean maintenance in oil and gas fields. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 973(1), 012045. doi: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2020MS&E..973a2045N/doi:10.1088/1757-899X/973/1/012045.

Hazarika, M., Dixit, U. S., & Davim, J. P. (2019). History of Production and Industrial Engineering Through Contributions of Stalwarts. *In Manufacturing Engineering Education* (pp. 1-29). Chandos Publishing. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101247-5.00001-0>.

Henderson, K., Pahlenkemper, G., & Kraska, O. (2014). Integrated asset management – an investment in sustainability. *Procedia engineering*, 83, 448-454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.077>.

Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review. *Technische Universität Dortmund*, Dortmund, 45. doi: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>.

Herrero, A. C., Sanguesa, J. A., Martinez, F. J., Garrido, P., & Calafate, C. T. (2021). Mitigating electromagnetic noise when using low-cost devices in industry 4.0. *IEEE Access*, 9, 63267-63282. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074588>.

Herrmann, C., Thiede, S., Stehr, J., e Bergmann, L. (2008). An environmental perspective on Lean Production. *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, 83-88. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-84800-267-8_16.

Hossen, J., Ahmad, N., & Ali, S. M. (2017). An application of Pareto analysis and cause-and-effect diagram (CED) to examine stoppage losses: a textile case from Bangladesh. *The journal of the textile institute*, 108(11), 2013-2020. doi: <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1308786>.

Hou, C., Qiao, T., Qiao, M., Xiong, X., Yang, Y., & Zhang, H. (2019). Research on audio-visual detection method for conveyor belt longitudinal tear. *IEEE Access*, 7, 120202-120213. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937660>.

Hristov, I., & Chirico, A. (2019). The role of sustainability key performance indicators (KPIs) in implementing sustainable strategies. *Sustainability*, 11(20), 5742. doi: <https://doi.org/10.3390/su11205742>.

Htun, A. R. K. A. R., Khaing, C. C., & Maw, T. T. (2019). Lean Manufacturing, Just in Time and Kanban: Case Study of Toyota Production System (TPS). *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 498-502.

Hussein, M., & Zayed, T. (2021). Critical factors for successful implementation of just-in-time concept in modular integrated construction: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124716>.

Igba, J., Alemzadeh, K., Anyanwu-Ebo, I., Gibbons, P., & Friis, J. (2013). A systems approach towards reliability-centred maintenance (RCM) of wind turbines. *Procedia Computer Science*, 16, 814-823. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.085>.

Ikeziri, L. M., Melo, J. C., Campos, R. T., Okimura, L. I., & Junior, J. A. G. (2020). A perspectiva da indústria 4.0 sobre a filosofia de gestão Lean Manufacturing. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 1274-1289. doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-089>.

Ireland, F., & Dale, B. G. (2001). A study of total productive maintenance implementation. *Journal of quality in maintenance engineering*, 7(3), 183-192. doi: <https://doi.org/10.1108/13552510110404495>.

Islas, L., Gutierrez, S. & Rodríguez, F. (2019). Wireless Sensor Network Prototype to Monitor the Condition of Holding Furnaces in the Aluminum Casting Plant. *IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*, 1, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEV.2019.8920457>.

Ismail, M. Z. M., Zainal, A. H., Kasim, N. I. & Mukhtar, M. A. F. (2019) A mini review: Lean management tools in assembly line at automotive industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 469. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/469/1/012086>.

Itani, A., Alghamdy, M., Nazir, H., Sharma, S., & Ahmad, R. (2020, September). A Decision-Making Tool to Integrate Lean 4.0 in Windows Manufacturing Using Simulation and Optimization Models. *In European Modeling & Simulation Symposium*, 137-145. doi: <https://doi.org/10.46354/i3m.2020.emss.018>.

Iuga, M. V., & Kifor, C. V. (2013). Lean manufacturing: The when, the where, the who. *Revista Academiei Fortelor Terestre*, 18(4), 404-410.

Iung, B., & Crespo Márquez, A. (2008). A review of e-maintenance capabilities and challenges. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 6 (1), 62-66.

- Ivina, D., & Olsson, N. O. (2020, July). Lean construction principles and railway maintenance planning. In Proc. 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC28), Berkeley, California, USA. doi: <https://doi.org/10.24928/2020/0025>.
- Jain, A., Bhatti, R., & Singh, H. (2014). Total productive maintenance (TPM) implementation practice: A literature review and directions. *International Journal of Lean Six Sigma*, 5(3), 293-323. doi: <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2013-0032>.
- Jantunen, E., Emmanouilidis, C., Arnaiz, A., & Gilabert, E. (2011). e-Maintenance: trends, challenges and opportunities for modern industry. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 453-458. doi: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02824>.
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Legutko, S., & Kluk, P. (2020). Maintenance 4.0 technologies—new opportunities for sustainability driven maintenance. *Management and production engineering review*, 11. doi: <http://dx.doi.org/10.24425/mper.2020.133730>.
- Joochim, O., & Meekaew, J. (2019). Applying total productive maintenance in aluminium conductor stranding process. *Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 1, 19-42.
- Jorge, D. P., & Peças, P. (2018). Mapeamento do progresso de moldes—uma ferramenta de gestão visual para a indústria 4.0. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 4(1), 68-81. doi: <https://doi.org/10.32358/rpd.2018.v4.312>.
- Kääriäinen, J., Pussinen, P., Saari, L., Kuusisto, O., Saarela, M., & Hänninen, K. (2021). Applying the positioning phase of the digital transformation model in practice for SMEs: toward systematic development of digitalization. *International journal of information systems and project management*, 8(4), 24-43.
- Kamat, P., & Sugandhi, R. (2020). Anomaly detection for predictive maintenance in industry 4.0-A survey. In *E3S web of conferences*, 170, 02007. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017002007>.
- Kaneko, H., Vlad, C., Takahashi, T., Ishida, H., & Sugiyama, K. (2021). Toyota motor corporation's legacy of transformation behind the global business growth strategy. *Romanian Economic and Business Review*, 16(2), 66-78.

Kang, N., Zhao, C., Li, J., & Horst, J. A. (2016). A Hierarchical structure of key performance indicators for operation management and continuous improvement in production systems. *International journal of production research*, 54(21), 6333-6350. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1136082>.

Kasza, J. (2019). Forth Industrial Revolution (4 IR): digital disruption of cyber-physical systems. *World Scientific News*, 134(2).

Kaushik, P., Khatak, E. N., & Kaloniya, J. (2015). Analyzing relevance and performance of 5S methodology: a review. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences*, 4(4), 21-33.

Kehr, T. W., & Proctor, M. D. (2017). People Pillars: Re-structuring the Toyota Production System (TPS) House Based on Inadequacies Revealed During the Automotive Recall Crisis. *Quality and Reliability Engineering International*, 33(4), 921-930. doi: <https://doi.org/10.1002/qre.2059>.

Kelendar, H. (2020). Lean thinking from Toyota manufacturing to the health care sector. *Research in Medical & Engineering Sciences*, 8(5), 913-923. doi: <http://dx.doi.org/10.31031/RMES.2020.08.000697>.

Khan, M. A. R., & Bilal, A. (2019, April). Literature survey about elements of manufacturing shop floor operation key performance indicators. In 2019 5th *International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 586-592. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2019.8813436>.

Khodabakhshian, R. (2013). Maintenance management of tractors and agricultural machinery: Preventive maintenance systems. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 147-159.

Kiangala, K. S., & Wang, Z. (2018). Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9), 3251-3271. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2093-8>.

Kigsirisin, S., Pussawiro, S., & Noohawm, O. (2016). Approach for total productive maintenance evaluation in water productivity: A case study at Mahasawat water treatment plant. *Procedia Engineering*, 154, 260-267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.472>.

Kinz, A.; Bernerstaetter, R.; Biedermann, H. Lean smart maintenance—efficient and effective asset management for smart factories. *In Proceedings of the 8th International Scientific Conference Management of Technology—Step to Sustainable Production*, Porec, Croatia, 1–3 June 2016.

Kirjanów-Błażej, A., & Rzeszowska, A. (2021). Conveyor belt damage detection with the use of a two-layer neural network. *Applied Sciences*, 11(12), 5480. doi: <https://doi.org/10.3390/app11125480>.

Kiss, M., Breda, G., & Muha, L. (2019). Information security aspects of Industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 32, 848-855. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.293>.

Ko, C. H., & Chung, N. F. (2014). Lean design process. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(6), 04014011. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000824](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000824).

Koenig, F., Found, P., & Kumar, M. (2019). Improving maintenance quality in airport baggage handling operations. *Total quality management & business excellence*, 30(sup1), S35-S52. doi: <https://doi.org/10.1080/14783363.2019.1665772>.

Koh, L., Orzes, G., & Jia, F. J. (2019). The fourth industrial revolution (Industry 4.0): technologies disruption on operations and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, 39(6/7/8), 817-828. doi: <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2019-788>.

Kolberg, D., Knobloch, J., & Zühlke, D. (2017). Towards a lean automation interface for workstations. *International journal of production research*, 55(10), 2845-2856. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1223384>.

Kominakis, D., Piratelli, C. L., & Achcar, J. A., 2018. Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia. *Revista Produção Online*, 18(2), 560-592. doi: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v18i2.2871>.

Kong, W. W., Shi, J. F., Zou, K. K., Li, N., Wang, Y. Y., Yan, D. X., & Li, Z. M. (2022). Synergistically optimizing interlaminar and electromagnetic interference shielding behavior of carbon fiber composite based on interfacial reinforcement. *Carbon*, 200, 448-455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.08.080>.

Konstantinidis, F. K., Kansizoglou, I., Santavas, N., Mouroutsos, S. G., & Gasteratos, A. (2020). Marma: A mobile augmented reality maintenance assistant for fast-track repair procedures in the context of industry 4.0. *Machines*, 8(4), 88. doi: <https://doi.org/10.3390/machines8040088>.

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

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

Kostoláni, M., Murín, J., & Kozák, Š. (2019, June). Intelligent predictive maintenance control using augmented reality. In 2019 22nd *International Conference on Process Control* (PC19), 131-135. doi: <https://doi.org/10.1109/PC.2019.8815042>.

Kumar, S., Dhingra, A. K., & Singh, B. (2018). Process improvement through Lean-Kaizen using value stream map: a case study in India. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 2687-2698. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1684-8>.

Lacerda, A. P., Xambre, A. R., & Alvelos, H. M. (2016). Applying Value Stream Mapping to eliminate waste: a case study of an original equipment manufacturer for the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 54(6), 1708-1720. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1055349>.

Lai, N. Y. G., Wong, K. H., Halim, D., Lu, J., & Kang, H. S. (2019, March). Industry 4.0 enhanced lean manufacturing. In 2019 8th *international conference on Industrial technology and management* (ICITM), 206-211. doi: <https://doi.org/10.1109/ICITM.2019.8710669>.

Lambán, M. P., Morella, P., Royo, J., & Sánchez, J. C. (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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108400>.

Langone, R., Cuzzocrea, A., & Skantzios, N. (2020). Interpretable Anomaly Prediction: Predicting anomalous behavior in industry 4.0 settings via regularized logistic

regression tools. *Data & Knowledge Engineering*, 130, 101850. doi: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2020.101850>.

Lazarevic, M., Mandic, J., Sremcevic, N., Vukelic, D., & Debevec, M. (2019). A systematic literature review of Poka-Yoke and novel approach to theoretical aspects. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 65(7-8), 454-467.

Lee, S. M., Lee, D., & Kim, Y. S. (2019). The quality management ecosystem for predictive maintenance in the Industry 4.0 era. *International Journal of Quality Innovation*, 5, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1186/s40887-019-0029-5>.

Leong, W. D., Lam, H. L., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., Tan, C. P., & Ponnambalam, S. G. (2019). Lean and green manufacturing—a review on its applications and impacts. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 3, 5-23. doi: <https://doi.org/10.1007/s41660-019-00082-x>.

Levrat, E., Iung, B. & Crespo Marquez, A. (2008). E-maintenance: review and conceptual framework. *Production Planning & Control*, 19(4), 408-429. doi: <https://doi.org/10.1080/09537280802062571>.

Lewandowski, R., & Olszewska, J. I. (2020, July). Automated task scheduling for automotive industry. In 2020 IEEE 24th *International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, 159-164. doi: <https://doi.org/10.1109/INES49302.2020.9147169>.

Li, Z., Wang, Y., & Wang, K. S. (2017). Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. *Advances in Manufacturing*, 5, 377-387. doi: <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0203-8>.

Liu, X., Peng, G., Liu, X., & Hou, Y. (2010). Development of a collaborative virtual maintenance environment with agent technology. *Journal of Manufacturing Systems*, 29(4), 173-181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.02.002>.

Lopes, I., Senra, P., Vilarinho, S., Sá, V., Teixeira, C., Lopes, J., ... & Figueiredo, M. (2016). Requirements specification of a computerized maintenance management system—a case study. *Procedia Cirp*, 52, 268-273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.047>.

Lopes, R. B., Freitas, F., & Sousa, I. (2015). Application of lean manufacturing tools in the food and beverage industries. *Journal of technology management & innovation*, 10(3), 120-130. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242015000300013>.

Luca, L., Pasare, M., Stancioiu, A., & Brancu, C. (2017). Study to determine a new model of the Ishikawa diagram for quality improvement. *Reliability Durab*, 1, 249-254.

Ma, J., Wang, Q., & Zhao, Z. (2017). SLAE–CPS: Smart lean automation engine enabled by cyber-physical systems technologies. *Sensors*, 17(7), 1500. doi: <https://doi.org/10.3390/s17071500>.

Madanhire, I., & Mbohwa, C. (2015). Implementing successful Total Productive Maintenance (TPM) in a manufacturing plant. In *Proceedings of the world congress on engineering* (Vol. 2, pp. 796-801).

Magadán, L., Suárez, F. J., Granda, J. C., & García, D. F. (2020). Low-cost real-time monitoring of electric motors for the Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 42, 393-398. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.057>.

Mahabir, R., & Punb, K. F. (2022). Improving CMMS-integrated Equipment Reliability in Compliance with the ISO 41001: 2018 Standard: A Case Study. *The Industrial Engineering and Management Journal*, 1(2), 62-72.

Maier, H. T., Schmiedbauer, O. & Biedermann, H. (2020). Validation of a Lean Smart Maintenance Maturity Model. *Tehnički glasnik*, 14(3), 296-302. doi: <https://doi.org/10.31803/tg-20200706131623>.

Majdouline, I., Dellagi, S., Mifdal, L., Kibbou, E. M., & Moufki, A. (2022). Integrated production-maintenance strategy considering quality constraints in dry machining. *International Journal of Production Research*, 60(9), 2850-2864. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1905193>.

Marciano, E. M., dos Santos Amarante, M., da Silva Baptistelli, E., Kusano, D. A. R., Barbará, J. F. F., Meguro, A. L., ... & Geribello, R. S. (2019). indústria 4.0–integração de sistema. *Revista Pesquisa e Ação*, 5(1), 75-92.

Maresova, P., Soukal, I., Svobodova, L., Hedvicakova, M., Javanmardi, E., Selamat, A., & Krejcar, O. (2018). *Consequences of industry 4.0 in business and economics*. *Economies*, 6(3), 46. doi: <https://doi.org/10.3390/economies6030046>.

- Marques, M., Agostinho, C., Zacharewicz, G., & Jardim-Gonçalves, R. (2017). Decentralized decision support for intelligent manufacturing in Industry 4.0. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(3), 299-313. doi: <https://doi.org/10.3233/AIS-170436>.
- Martinetti, A., Awadhpersad, P., Singh, S. & van Dongen, L. A. M. (2021). Gone in 2s: a deep dive into perfection analysing the collaborative maintenance pitstop of Formula 1. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 27(3), 550-564. doi: <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2020-0062>.
- Martins, L., Silva, F. J., Pimentel, C., Casais, R. B., & Campilho, R. D. S. G. (2020). Improving preventive maintenance management in an energy solutions company. *Procedia Manufacturing*, 51, 1551-1558. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.216>.
- Masoni, R., Ferrise, F., Bordegoni, M., Gattullo, M., Uva, A. E., Fiorentino, M., ... & Di Donato, M. (2017). Supporting remote maintenance in industry 4.0 through augmented reality. *Procedia manufacturing*, 11, 1296-1302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.257>.
- Maware, C., & Adetunji, O. (2019). Lean manufacturing implementation in Zimbabwean industries: Impact on operational performance. *International Journal of Engineering Business Management*, 11, 1847979019859790. doi: <https://doi.org/10.1177/1847979019859790>.
- Mayr, A., Weigelt, M., Kühl, A., Grimm, S., Erll, A., Potzel, M., & Franke, J. (2018). Lean 4.0-A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia Cirp*, 72, 622-628. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.292>.
- Meddaoui, A. (2018). A New Manufacturing Improvement Model Based on Overall Equipment Effectiveness and Lean Maintenance. *Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18)*. doi: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3185329>.
- Mehmeti, X., Mehmeti, B., Sejdiu, R. (2018). The equipment maintenance management in manufacturing enterprises. *Conference proceedings 18th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability TECIS 2018*, 13-15 September 2018, Baku, Azerbaijan. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.192>.

Melo, F. T., & Loos, M. J. (2018). Análise da metodologia da Manutenção Produtiva Total (TPM): Estudo de caso. *Revista Espacios*, 39(3).

Mendes, A. A., & Ribeiro, J. L. D. (2011). Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC. *Production*, 21, 583-593. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132011005000032>.

Mendes, D. S. F. T., Navas, H. V. G., & Charrua-Santos, F. M. B. (2021). Relationship between maintenance, lean philosophy, and Industry 4.0: Systematic Literature Review. In *European Professors of Industrial Engineering and Management*, 54, 54-59

Mendes, D. S., Navas, H. V., & Charrua-Santos, F. M. (2023). Improving the performance of a conveyor belt through lean philosophy and Industry 4.0. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2022-0055>.

Mendes, D. S., Navas, H. V., Didelet, F., & Charrua-Santos, F. (2022). Improvement of maintenance management through Lean Philosophy and Industry 4.0. *Maintenance, Reliability and Condition Monitoring*, 2(1), 17-27. doi: <https://doi.org/10.21595/marc.2022.22472>.

Mendes, D., Gaspar, P. D., Charrua-Santos, F., & Navas, H. (2023). Integrating TPM and Industry 4.0 to Increase the Availability of Industrial Assets: A Case Study on a Conveyor Belt. *Processes*, 11(7), 1956. <https://doi.org/10.3390/pr11071956>.

Mendes, D., Gaspar, P. D., Charrua-Santos, F., & Navas, H. (2023). Enhanced Real-Time Maintenance Management Model—A Step toward Industry 4.0 through Lean: Conveyor Belt Operation Case Study. *Electronics*, 12(18), 3872. <https://doi.org/10.3390/electronics12183872>.

Meneghini, C., & Zaions, D. R. (2019). A manutenção centrada em confiabilidade aplicada a um sistema de embalagem de presunto de uma indústria alimentícia. *Brazilian Journal of Business*, 1(3), 1197-1206.

Meneghini, C., 2017. Análise voltada para manutenção centrada em confiabilidade em condensador de mini-frigorífico. *Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Joaçaba*, 2, e16390-e16390.

Menga, L. (2022). Industrial revolution and the birth of modern architecture. *International Scientific Journal Vision*, 7(1), 105-123.

Mey, O., Schneider, A., Enge-Rosenblatt, O., Mayer, D., Schmidt, C., Klein, S., & Herrmann, H. G. (2021). Condition monitoring of drive trains by data fusion of acoustic emission and vibration sensors. *Processes*, 9(7), 1108. doi: <https://doi.org/10.3390/pr9071108>.

Miao, D., Wang, Y., & Li, S. (2022). Sound-Based Improved DenseNet Conveyor Belt Longitudinal Tear Detection. *IEEE Access*, 10, 123801-123808. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3224430>.

Mičieta, B., Howaniec, H., Biñasová, V., Kasajová, M. & Fusko, M. (2021). Increasing Work Efficiency in a Manufacturing Setting Using Gemba Walk. *European Research Studies Journal*, Vol. XXIV, 4, 601-620.

Milewski, D. (2022). Managerial and Economical Aspects of the Just-In-Time System “Lean Management in the Time of Pandemic”. *Sustainability*, 14(3), 1204. doi: <https://doi.org/10.3390/su14031204>.

Mohammad-Amini, M., Einabadi, B., Baboli, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2021, April). Determination of health key performance indicators and their visualization in the production system in the context of industry 4.0. In 2021 IEEE 8th *International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 126-131. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIEA52957.2021.9436703>.

Mohammadi, A., Igwe, C., Amador-Jimenez, L., & Nasiri, F. (2022). Applying lean construction principles in road maintenance planning and scheduling. *International journal of construction management*, 22(12), 2364-2374. doi: <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1788758>.

Moll, I. (2021). The myth of the fourth industrial revolution. *Theoria*, 68(167), 1-38.

Moreira, E. E., Alves, F. S., Martins, M., Ribeiro, G., Pina, A., Aguiam, D. E., ... & Gaspar, J. (2020, September). Industry 4.0: Real-time monitoring of an injection molding tool for smart predictive maintenance. In 2020 25th IEEE *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1, 1209-1212. doi: <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212167>.

Mostafa, S., Dumrak, J., & Soltan, H. (2015). Lean maintenance roadmap. *Procedia Manufacturing*, 2, 434-444. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.076>.

Mourtzis, D., Papatheodorou, A. M., & Fotia, S. (2018). Development of a key performance indicator assessment methodology and software tool for product-service system evaluation and decision-making support. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 18(4), 041005. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4040340>.

Mouzani, I., & Bouami, D. 2019. The Integration of Lean Manufacturing and Lean Maintenance to Improve Production Efficiency. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(1), 593-604.

Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L., & Martin, H. (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 295-302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.039>.

Muller, A., Marquez, A. C., & Iung, B. (2008). On the concept of e-maintenance: Review and current research. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(8), 1165-1187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.08.006>.

Naciri, L., Mouhib, Z., Gallab, M., Nali, M., Abbou, R., & Kebe, A. (2022). Lean and industry 4.0: A leading harmony. *Procedia Computer Science*, 200, 394-406. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.238>.

Narayanan, B., & Sreekumar, M. (2022). Design, modelling, optimisation and validation of condition-based maintenance in IoT enabled hybrid flow shop. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-15. doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2028011>.

Nawaiseh, K. H. A., Alawamleh, H., Al Shibly, M., Almari, M., Orabi, T. A., Jerisat, R., & Badadwa, A. (2022). The Relationship Between the Enterprise Resource Planning System and Maintenance Planning System: An Empirical Study. *Information Sciences Letters*, 11(5), 1-11. doi: <http://dx.doi.org/10.18576/isl/110502>.

Netto, R., Santos, E., & Loures, E. (2015). Restrições no uso da Informação de Chão de Fábrica na Gestão de Manutenção. In *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, 447-454.

Neves, P., Silva, F. J. G., Ferreira, L. P., Pereira, T., Gouveia, A., & Pimentel, C. (2018). Implementing lean tools in the manufacturing process of trimmings products. *Procedia Manufacturing*, 17, 696-704. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.119>.

Nissoul, H., El Harroui, T., Serrou, D., & Abouabdellah, A. (2020, October). Impact of maintenance 4.0 on the performance of the production function: Application to the automotive industry in Morocco. In 2020 5th *International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/GOL49479.2020.9314737>.

Nota, G., Peluso, D., & Lazo, A. T. (2021). The contribution of Industry 4.0 technologies to facility management. *International Journal of Engineering Business Management*, 13, 18479790211024131. doi: <https://doi.org/10.1177/18479790211024131>.

Nounou, A., Jaber, H., & Aydin, R. (2022). A cyber-physical system architecture based on lean principles for managing industry 4.0 setups. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-19. doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027016>.

Novák, A., Sedláčková, A. N., Bugaj, M., Kandra, B., & Lusiak, T. (2020). Use of unmanned aerial vehicles in aircraft maintenance. *Transportation Research Procedia*, 51, 160-170. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.11.018>.

NP EN 13269:2023, Manutenção – Instruções para a preparação de contratos de manutenção. 2007. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 13306:2021, Terminologia da Manutenção. 2017. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 13460:2009, Documentação para a manutenção (presentes num sistema de gestão da manutenção). 2009. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 15341:2022, Indicadores de desempenho da manutenção (KPI). 2009. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 4483:2009, Guia para a implementação do sistema de gestão de manutenção. 2009. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 4492:2023, Requisitos para a prestação de serviços de manutenção. 2010. Instituto Português da Qualidade.

Okpala, C., Anozie, S., & Ezeanyim, O. (2018). The application of tools and techniques of total productive maintenance in manufacturing. *International Journal of Engineering Science*, 8(6).

Oliveira, J., Sá, J. C., & Fernandes, A. (2017). Continuous improvement through "Lean Tools": An application in a mechanical company. *Procedia Manufacturing*, 13, 1082-1089. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.139>.

Otani, M., & Machado, W. V. (2008). A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. *Revista Gestão Industrial*, 4(2). doi: <http://dx.doi.org/10.3895/S1808-04482008000200001>.

Pais, E., Farinha, J. T., Cardoso, A. J. M., & Raposo, H. (2020). Optimizing the life cycle of physical assets—a review. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 15, 417-430. doi: <http://dx.doi.org/10.37394/23203.2020.15.42>.

Paladugu, B. S., & Grau, D. (2020). Toyota production system-monitoring construction work progress with lean principles. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 1-5, 560-565). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11512-7>.

Palmeira, T., Navas, H., & Morgado, T. (2015). Lean maintenance management activities in an oil terminal: case study. In *M2D'2015-6th International Conference on Mechanics and Materials in Design*.

Paluch, S. (2014). Customer expectations of remote maintenance services in the medical equipment industry. *Journal of Service Management*, 25(5), 639-653. doi: <https://doi.org/10.1108/JOSM-07-2013-0195>.

Paolanti, M., Romeo, L., Felicetti, A., Mancini, A., Frontoni, E., & Loncarski, J. (2018, July). Machine learning approach for predictive maintenance in industry 4.0. In 2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/MESA.2018.8449150>.

Parikh, Y., & Mahamuni, P. (2015). Total Productive Maintenance: Need & Framework. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, 2(2), 126-130.

Passath, T. & Mertens, K., 2019. Decision Making in Lean Smart Maintenance: Criticality Analysis as a Support Tool. *IFAC Papers Online* 52 (10), 364-369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.058>.

Pereira, C., & Sachidananda, H. K. (2022). Impact of industry 4.0 technologies on lean manufacturing and organizational performance in an organization. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 16(1), 25-36. doi: <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00797-7>.

Phuong, N. A., & Guidat, T. (2018, July). Sustainable value stream mapping and technologies of Industry 4.0 in manufacturing process reconfiguration: A case study in an apparel company. In 2018 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), 85-90. doi: <https://doi.org/10.1109/SOLI.2018.8476750>.

Pinjala, S. K., Pintelon, L., & Vereecke, A. (2006). An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. *International journal of production economics*, 104(1), 214-229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.12.024>.

Pinto A. *Manual de Segurança na Manutenção*. 1.a Edição. Robalo M, editor. Lisboa: Edições Silabo, Lda.; 2016.

Pinto, G. F. L., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Casais, R. B., Fernandes, A. J., & Baptista, A. (2019). Continuous improvement in maintenance: a case study in the automotive industry involving Lean tools. *Procedia Manufacturing*, 38, 1582-1591. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.127>.

Pinto, J. P. (2013). *Manutenção Lean*. Lisboa: Lidel - Edições Técnicas. ISBN 978- 972-757-877-1.

Pires, C. A., & Okada, R. H. (2020). Manutenção preditiva: estratégia de produção e redução de custos. *Revista Interface Tecnológica*, 17(1), 635-647.

Poduval, P. S., Pramod, V. R., & Raj, J. V. P. (2013). Barriers in TPM implementation in industries. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2(5).

Pombal, T., Ferreira, L. P., Sá, J. C., Pereira, M. T., & Silva, F. J. G. (2019). Implementation of lean methodologies in the management of consumable materials in

the maintenance workshops of an industrial company. *Procedia Manufacturing*, 38, 975-982. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.181>.

Poór, P., Basl, J. & Ženíšek, D. (2019). Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions. *Conference proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 23-26 July, Pilsen, Czech Republic, 495-504.

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

Portilho, G. R., Ferreira, C. Á. M., Albuini, R. M., & Lucas, V. H. S. (2020). A IOT (Internet of things) no cenário brasileiro: suas vantagens e os principais desafios para sua implementação e expansão. *Revista Mythos*, 13(1), 36-50. doi: <https://doi.org/10.36674/mythos.v13i1.438>.

Poves-Calderno, I. G., Ramirez-Mendoza, J. A., Nuñez-Ponce, V. H., & Alvarez-Merino, J. C. (2019, December). Application of Lean Manufacturing Techniques in a Peruvian Plastic Company. In *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 546-550. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEM44572.2019.8978813>.

Qiu, J., Zhao, C., Zhang, X., & Hu, Y. (2014, May). A comparative simulation on corrective maintenance strategies in cellular manufacturing considering worker collaboration. In *Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, 202-207. doi: <https://doi.org/10.1109/CSCWD.2014.6846842>.

Rachidi, A., Talbi, A., & Khatory, A. (2012). The industrial maintenance: a function by mutation and the skills in evolution. *International Journal of Research and Reviews in Mechatronic Design and Simulation (IJRRMDS)*, 2(2).

Raimundo, R. J., & Rosário, A. T. (2022). Cybersecurity in the internet of things in industrial management. *Applied Sciences*, 12(3), 1598. doi: <https://doi.org/10.3390/app12031598>.

- Rajput, H. S., & Jayaswal, P. (2012). A total productive maintenance (TPM) approach to improve overall equipment efficiency. *International Journal of modern engineering research*, 2(6), 4383-4386.
- Ramadan, M., & Salah, B. (2019). Smart lean manufacturing in the context of Industry 4.0: a case study. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 13(3), 174-181.
- Ramakrishnan, V., & Nallusamy, S. (2017). Implementation of total productive maintenance lean tool to reduce lead time-A case study. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(12), 295-306.
- Rani, N. A. A., Baharum, M. R., Akbar, A. R. N., & Nawawi, A. H. (2015). Perception of maintenance management strategy on healthcare facilities. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 170, 272-281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.037>.
- Raza, T., Muhammad, M. B., & Majid, M. A. A. (2016). A comprehensive framework and key performance indicators for maintenance performance measurement. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(20), 12146-12152.
- Rediske, G., Michels, L., Siluk, J. C. M., Rigo, P. D., Brum Rosa, C., & Bortolini, R. J. F. (2022). Management of operation and maintenance practices in photovoltaic plants: Key performance indicators. *International Journal of Energy Research*, 46(6), 7118-7136. doi: <https://doi.org/10.1002/er.7737>.
- Rewers, P., Trojanowska, J., & Chabowski, P. (2016, June). Tools and methods of Lean Manufacturing-a literature review. *In Proceedings of 7th international technical conference technological forum*, 28-30.
- Ribeiro, D. R. S., Mendes L. G. & Forcellini, F. A. (2017). Lean Maintenance: Uma proposta de Gerenciamento da Rotina de Manutenção por meio da Gestão Visual. VII Congresso de Sistemas Lean 10 e 11 Novembro, Niterói, RJ.
- Ribeiro, I. M., Godina, R., Pimentel, C., Silva, F. J. G., & Matias, J. C. O. (2019). Implementing TPM supported by 5S to improve the availability of an automotive production line. *Procedia Manufacturing*, 38, 1574-1581. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.128>.

Rifqi, H., Souda, S. B., Zamma, A., & Kassami, S. (2020). Lean Facility Management 4.0: A Case Study. *International Journal*, 8(10). doi: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/1138102020>.

Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2020). Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1644-1661. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1672902>.

Rousopoulou, V., Nizamias, A., Vafeiadis, T., Ioannidis, D., & Tzovaras, D. (2020). Predictive maintenance for injection molding machines enabled by cognitive analytics for industry 4.0. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 3, 578152. doi: <https://doi.org/10.3389/frai.2020.578152>.

Ruiz-Sarmiento, J. R., Monroy, J., Moreno, F. A., Galindo, C., Bonelo, J. M., & Gonzalez-Jimenez, J. (2020). A predictive model for the maintenance of industrial machinery in the context of industry 4.0. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103289. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103289>.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston consulting group*, 9(1), 54-89.

Sahal, R., Breslin, J. G., & Ali, M. I. (2020). Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case. *Journal of manufacturing systems*, 54, 138-151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.11.004>.

Salmasnia, A., Hajihosseini, Z., & Maleki, M. R. (2022). An economic manufacturing quantity model with rework process for deteriorating products under maintenance-quality policy. *International Journal of Modelling and Simulation*, 42(6), 946-965. doi: <https://doi.org/10.1080/02286203.2021.2004341>.

Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811-833.

- Santos, B., Alberto, A., Lima, T. & Charrua-Santos, F. (2018). Indústria 4.0: Desafios e oportunidades. *Revista de Produção e Desenvolvimento* 4 (1), 111-124. doi: <https://doi.org/10.32358/rpd.2018.v4.316>.
- Schindlerová, V., Šajdlerová, I., Michalčík, V., Nevima, J., & Krejčí, L. (2020). Potential of using TPM to increase the efficiency of production processes. *Tehnicki vjesnik*, 27(3), 737-743. doi: <https://doi.org/10.17559/TV-20190328130749>.
- Schulze, F., & Dallasega, P. (2020). Industry 4.0 Concepts and Lean Methods Mitigating Traditional Losses in Engineer-to-Order Manufacturing with Subsequent Assembly On-Site: A Framework. *Procedia Manufacturing*, 51, 1363-1370. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.190>.
- Şenkayas, H., & Gürsoy, Ö. (2018). Industry 4.0 Applications And Digitilization Of Lean Production Lines. *The Annals of the University of Oradea*, 124.
- Senthil, C., & Sudhakara Pandian, R. (2022). Proactive maintenance model using reinforcement learning algorithm in rubber industry. *Processes*, 10(2), 371. doi: <https://doi.org/10.3390/pr10020371>.
- Serrou, D., Khlie, K., & Abouabdellah, A. (2016, October). Improvement of the lean-maintenance by hospital logistics. In *2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt)*, 19-24. doi: <https://doi.org/10.1109/CIST.2016.7805047>.
- Sethia, C. S., Shende, P. N., & Dange, S. S. (2014). Total productive maintenance-a systematic review. *International journal for scientific research & development* (8), 124-127.
- Shaheen, B. W., & Németh, I. (2022). Integration of maintenance management system functions with industry 4.0 technologies and features—A review. *Processes*, 10(11), 2173. doi: <https://doi.org/10.3390/pr10112173>.
- Shahin, M., Chen, F. F., Bouzary, H. & Krishnan, K. (2020). Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. *The International Journal of Advanced Technology*, 107:2927-2936. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05124-0>.

Shahin, M., Chen, F. F., Bouzary, H., & Zarreh, A. (2020). Frameworks proposed to address the threat of cyber-physical attacks to lean 4.0 systems. *Procedia Manufacturing*, 51, 1184-1191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.166>.

Shanmuganathan, V. K., Haran, A. P., & Gayathri, N. (2015). Condition monitoring maintenance of aero-engines through LUMS—A method for the implementation of Lean tools. *Measurement*, 73, 226-230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.017>.

Sharma, A., & Singh, B. J. (2020). Evolution of industrial revolutions: A review. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(11), 66-73.

Shinde, R. K., Alam, M. S., Park, S. G., Park, S. M., & Kim, N. (2022). Intelligent IoT (IIoT) Device to Identifying Suspected COVID-19 Infections Using Sensor Fusion Algorithm and Real-Time Mask Detection Based on the Enhanced MobileNetV2 Model. *Healthcare*, 10, 454. doi: <https://doi.org/10.3390/healthcare10030454>.

Shohet, I. M., & Nobili, L. (2017). Application of key performance indicators for maintenance management of clinics facilities. *International Journal of Strategic Property Management*, 21(1), 58-71. doi: <https://doi.org/10.3846/1648715X.2016.1245684>.

Shou, W., Wang, J., Wu, P., & Wang, X. (2021). Lean management framework for improving maintenance operation: Development and application in the oil and gas industry. *Production Planning & Control*, 32(7), 585-602. doi: <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1744762>.

Si, G., Xia, T., Pan, E., & Xi, L. (2022). Service-oriented global optimization integrating maintenance grouping and technician routing for multi-location multi-unit production systems. *IISE Transactions*, 54(9), 894-907. doi: <https://doi.org/10.1080/24725854.2021.1957181>.

Silva Santos, Á. L., & Silva, E. E. S. (2021). Os recursos humanos na implementação da manutenção produtiva total (tpm): impactos na cultura organizacional. *Revista Eletrônica da Estácio Recife*, 7(3).

Silva, P. C., Santandrea, R. S., Brandão, L. C., Xavier, M. V. A., & Volpini, V. L. (2020). Manufatura aditiva: Revisão sistemática da literatura. *Brazilian Journal of Development*, 6(11), 84502-84515. doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-023>.

Silvestri, L., Forcina, A., Introna, V., Santolamazza, A., & Cesarotti, V. (2020). Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 123, 103335. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>.

Singh, J. (2021). Applying lean methodology to curriculum revision and internship placement process-a case study. *Journal of Research in Innovative Teaching & Learning*, 14(2), 288-305

Singh, J., & Singh, H. (2020). Justification of TPM pillars for enhancing the performance of manufacturing industry of Northern India. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 69(1), 109-133.

Singh, R. K., & Gurtu, A. (2022). Prioritizing success factors for implementing total productive maintenance (TPM). *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(4), 810-830. doi: <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2020-0098>.

Sinha, D., & Roy, R. (2020). Reviewing cyber-physical system as a part of smart factory in industry 4.0. *IEEE Engineering Management Review*, 48(2), 103-117. doi: <https://doi.org/10.1109/EMR.2020.2992606>.

Sipsas, K., Alexopoulos, K., Xanthakis, V., & Chryssolouris, G. (2016). Collaborative maintenance in flow-line manufacturing environments: An Industry 4.0 approach. *Procedia Cirp*, 55, 236-241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.09.013>.

Solano, N. E. C., Llinás, G. A. G., Montoya-Torres, J. R., & Polo, L. E. R. (2020). A planning model of crop maintenance operations inspired in lean manufacturing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105852. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105852>.

Solberg, E., Sverdrup, T. E., Sandvik, A. M., & Schei, V. (2022). Encouraging or expecting flexibility? How small business leaders' mastery goal orientation influences employee flexibility through different work climate perceptions. *human relations*, 75(12), 2246-2271. doi: <https://doi.org/10.1177/00187267211042538>.

Sousa, F. J. D. M. (2023). Modelos de Sistemas de Supervisão na Indústria 4.0. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, 9(1), 27-48.

Spear, B. (2008). James Watt: The steam engine and the commercialization of patents. *World patent information*, 30(1), 53-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2007.05.009>.

Spenhoff, P., Wortmann, J. C., & Semini, M. (2022). EPEC 4.0: an Industry 4.0-supported lean production control concept for the semi-process industry. *Production Planning & Control*, 1-18. doi: <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1864496>.

Statsenko, E., Omarov, R., Shlykov, S., Nesterenko, A., & Konieva, O. (2021). Pareto and Ishikawa diagrams for identifying the causes of defects in poultry meat. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 12(12), 1-8.

Stefani, E., Oliveira, J. M. B., Montini, P., Wanderley, J. F., & Costa, I. (2021). Aplicabilidade da Filosofia Lean na Indústria 4.0. *Brazilian Journal of Development*, 7(3), 21335-21348. doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-036>.

Suryaprakash, M., Prabha, M. G., Yuvaraja, M., & Revanth, R. R. (2021). Improvement of overall equipment effectiveness of machining centre using tpm. *Materials Today: Proceedings*, 46, 9348-9353. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.820>.

Taggart, M., Willis, C., & Hanahoe, J. (2019). Not seeing the wood for the trees-a Gemba Walk through a timber framed housing development. In *Proceedings of 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 1209-1218. doi: <https://doi.org/10.24928/2019/0231>.

Tale, T. (2019). Reliability Centered Maintenance (RCM): Methodology and Benefits. *International Journal of Commerce and Management*, 4(3), 1-8.

Tee, W. K., Wijayanuddin, M., & Harisun, Y. (2019). Strategic Asset Management Maintenance Framework in Asset Reliability Management for Oleochemical Industry in Malaysia. *Advanced Journal of Technical and Vocational Education (AGTVE) Journal*, 3, 7-13. doi: <https://doi.org/10.26666/rmp.ajtve.2019.1.2>.

Tekin, M., Arslandere, M., Etlioğlu, M., Koyuncuoğlu, Ö., & Tekin, E. (2019). An application of SMED and Jidoka in lean production. In *Proceedings of the*

International Symposium for Production Research 2018, 18, 530-545. Springer International Publishing. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92267-6_45.

Thames, L., & Schaefer, D. (2017). Cybersecurity for industry 4.0, 1-33. *Heidelberg: Springer*.

Tissir, S., El Fezazi, S., & Cherrafi, A. (2020, December). Industry 4.0 impact on lean manufacturing: literature review. In *2020 IEEE 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*, 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA49782.2020.9353889>.

Toazza, G. F., & Sellitto, M. A. (2015). Estratégia de manutenção preditiva no departamento gráfico de uma empresa do ramo fumageiro. *Revista Produção Online*, 15(3), 783-806. doi: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v15i3.1623>.

Toma, S. G., & Naruo, S. (2017). Total quality management and business excellence: the best practices at Toyota Motor Corporation. *Amfiteatru Economic Journal*, 19(45), 566-580.

Tortorella, G., Saurin, T.A., Fogliatto, F.S., Tlapa, D., Moyano-Fuentes, J., Gaiardelli, P., Seyedghorban, Z., Vassolo, R., Mac Cawley, A.F., Sunder M, V., Sreedharan, V.R., Sena, S.A. & Forstner, F.F. (2022). The impact of Industry 4.0 on the relationship between TPM and maintenance performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(3), 489-520. doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2021-0399>.

Tranfield, D., Denyer, D. & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management* 14 (3), 207-222. doi: <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.

Trojan, F., & Marçal, R. F. (2017). Proposal of maintenance-types classification to clarify maintenance concepts in production and operations management. *Journal of Business Economics*, 8(7), 560-572. doi: [https://doi.org/10.15341/jbe\(2155-7950\)/07.08.2017/005](https://doi.org/10.15341/jbe(2155-7950)/07.08.2017/005).

Tsao, Y. C., Lee, P. L., Liao, L. W., Zhang, Q., Vu, T. L., & Tsai, J. (2020). Imperfect economic production quantity models under predictive maintenance and reworking. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 7(4), 347-360. doi: <https://doi.org/10.1080/23302674.2019.1590663>.

- Uriarte, A. G., Ng, A. H., & Moris, M. U. (2018). Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 25, 586-593. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.097>.
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0—a glimpse. *Procedia manufacturing*, 20, 233-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>.
- Valamede, L. S., & Akkari, A. C. S. (2020). Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 5(5), 851. doi: <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2020.5.5.066>.
- Varela, L., Araújo, A., Ávila, P., Castro, H., & Putnik, G. (2019). Evaluation of the relation between lean manufacturing, industry 4.0, and sustainability. *Sustainability*, 11(5), 1439. doi: <https://doi.org/10.3390/su11051439>.
- Velmurugan, K., Saravanasankar, S., Venkumar, P., Sudhakarapandian, R., & Di Bona, G. (2022). Hybrid fuzzy AHP-TOPSIS framework on human error factor analysis: Implications to developing optimal maintenance management system in the SMEs. *Sustainable Futures*, 4, 100087. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100087>.
- Ventura, K. S., & Suquizaqui, A. B. V. (2019). Aplicação de ferramentas SWOT e 5W2H para análise de consórcios intermunicipais de resíduos sólidos urbanos. *Ambiente construído*, 20, 333-349. doi: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000100378>.
- Vogel, B., Dong, Y., Emruli, B., Davidsson, P., & Spalazzese, R. (2020). What is an open IoT platform? Insights from a systematic mapping study. *Future Internet*, 12(4), 73. doi: <https://doi.org/10.3390/fi12040073>.
- Wagner, T., Herrmann, C., & Thiede, S. (2017). Industry 4.0 impacts on lean production systems. *Procedia Cirp*, 63, 125-131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.041>.
- Wang, N., Ren, S., Liu, Y., Yang, M., Wang, J., & Huisingh, D. (2020). An active preventive maintenance approach of complex equipment based on a novel product-service system operation mode. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123365>.

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. *International journal of distributed sensor networks*, 12(1), 3159805. doi: <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>.

Wenchi, S., Wang, J., Wang, X., & Chong, H. Y. (2015, September). An application of value stream mapping for turnaround maintenance in oil and gas industry: Case study and lessons learned. *In Proceedings of 31st Annual ARCOM Conference*, 7-9.

Wienker, M., Henderson, K., & Volkerts, J. (2016). The computerized maintenance management system an essential tool for world class maintenance. *Procedia Engineering*, 138, 413-420. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>.

Wilson, R., George, G., & Joseph, K. (2020). An introduction to materials for potential EMI shielding applications: Status and future. *In Materials for Potential EMI Shielding Applications*, 1-8. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817590-3.00001-4>.

Xiang, Z. T., & Chin, J. F. (2021). Implementing total productive maintenance in a manufacturing small or medium-sized enterprise. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 14(2), 152-175.

Yamamoto, K., Milstead, M., & Lloyd, R. (2019). A review of the development of lean manufacturing and related lean practices: The case of Toyota Production System and managerial thinking. *International Management Review*, 15(2), 21-90.

Yile, L., Hang, X. X., & Lei, Z. (2008, December). Lean Maintenance framework and its application in clutch maintenance. *In 2008 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 3, 230-232. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIII.2008.84>.

Yunusa-Kaltungo, A., & Labib, A. (2021). A hybrid of industrial maintenance decision making grids. *Production Planning & Control*, 32(5), 397-414. doi: <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1741046>.

Zhang, K., Qu, T., Zhou, D., Thürer, M., Liu, Y., Nie, D., ... & Huang, G. Q. (2019). IoT-enabled dynamic lean control mechanism for typical production systems. *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, 10(3), 1009-1023. doi: <https://doi.org/10.1007/s12652-018-1012-z>.

Zhang, Y., Ji, J. C., Ren, Z., Ni, Q., Gu, F., Feng, K., ... & Liu, Z. (2023). Digital twin-driven partial domain adaptation network for intelligent fault diagnosis of rolling bearing. *Reliability Engineering & System Safety*, 234, 109186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109186>.

Zhang, Y., Ren, Z., Feng, K., Yu, K., Beer, M., & Liu, Z. (2023). Universal source-free domain adaptation method for cross-domain fault diagnosis of machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 191, 110159. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110159>.

Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., Perona, M., 2021. The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research* 59 (6), 1922-1954. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824085>.

Zhou, J., Zhang, Y., Jiang, Y., Chen, C. P., & Chen, L. (2015, August). A distributed k-means clustering algorithm in wireless sensor networks. In *2015 International Conference on Informative and Cybernetics for Computational Social Systems (ICCSS)*, 26-30. IEEE.

Zhu, G., Gelders, L., & Pintelon, L. (2002). Object/objective-oriented maintenance management. *Journal of quality in maintenance engineering*, 8(4), 306-318. doi: <https://doi.org/10.1108/1355251021048513>.

Zlatic, M. (2019). TPM-total productive maintenance. *Proceedings on Engineering Sciences*, 1(2), 581-590.

Zonta, T., Da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>.

Anexo A

A.1. Modelos já existentes com a Interação dos Tópicos: Manutenção e Filosofia *Lean* e Indústria 4.0

A tabela seguinte apresenta alguns modelos já existentes com a interação dos tópicos: Manutenção e Filosofia *Lean* e Indústria 4.0 alguns aspetos mais relevantes dos estudos analisados. Esta está dividida pela interação: Manutenção e *Lean* (ML); Manutenção e Indústria 4.0 (MI4.0); *Lean* e Indústria 4.0 (LI4.0) e Manutenção *Lean* e Indústria 4.0 (MLI4.0). Também é possível observar o tipo de tecnologia ou metodologia utilizada segundo o conceito, os benefícios obtidos, assim como outros dados relevantes como o tipo de indústria entre outras observações.

Tabela A.1 – Tabela resumo dos modelos já existentes de aplicação conjunta dos três conceitos.

Autor(es) e ano	Indústria	Interação conceitos	Ferramentas FL	Tecnologias I4.0	Tipo de desenvolvimento		Benefícios
					Modelo	Estudo de caso	
Shahin <i>et al.</i> , 2020	-	FLI4.0	<i>Kanban</i>	<i>Cloud Computing Dashboard</i>	x	x	Visualização em tempo real do processo de produção, quantidade real produzida, horas de trabalho utilizadas, número de itens com má qualidade, número de paragens de linha. Melhoria da tomada de decisão.
Dănuț-Sorin <i>et al.</i> , 2020	Indústria de produtos poliméricos	FLI4.0	<i>Lean 4.0 instruments</i> (e.g., <i>Kanban</i> , <i>Jidoka</i>)	<i>Big Data Sensors</i> <i>Adaptative Robots</i> <i>Data analysis</i> <i>IoT&IIoT</i>		x	Permite uma gestão inteligente da produção, adaptável e flexível.
Gaziero & Ceconello, 2019	Indústria de mobiliário	FLI4.0	VSM	<i>Simulation</i>		x	Melhoria do desempenho produtivo e tomada de decisão. Maior disponibilidade de equipamentos. Redução do chumbo ideal. Eliminação de tarefas que não acrescentam valor.
Şenkayas & Gürsoy, 2018	Jantes	FLI4.0	OEE	<i>Digitalization</i> MES		x	Melhoria do processo de produção e da OEE. Obtenção de informações úteis sobre a produção
Wagner <i>et al.</i> , 2017	Indústria automóvel	FLI4.0	JIT	CPS	x	x	Melhoria na escolha das metodologias <i>Lean</i> e tecnologias I4.0.
Zhang <i>et al.</i> , 2019	Indústria Tintas/pintura	FLI4.0	<i>Lean-Oriented Optimum-State Control Theory</i> (L-OSCT)	IoT	x	x	Melhorar a eficiência global. Permite um controlo estatal ideal do sistema produtivo em larga escala.

Uriarte <i>et al.</i> , 2018	-	FLI4.0	<i>Lean tools</i>	<i>Data Mining Simulation-based multi-objective optimization (SMO)</i>	x		Facilitará a avaliação e a tomada de decisões face a cenários complexos e dinâmicos. Aprendizagem organizacional apoiada.
Schulze & Dallasega, 2020	-	FLI4.0	<i>Lean tools</i>	<i>I4.0 Techniques</i>	x		Permite o mapeamento de ferramentas e tecnologias magras da indústria 4.0 com as categorias de perdas. Escolha a ferramenta mais adequada para cada aplicação.
Dombrowski <i>et al.</i> , 2017	-	FLI4.0	<i>Lean tools</i>	<i>I4.0 Techniques</i>	x		Correlação entre conceitos de filosofia <i>lean</i> e indústria 4.0. Escolha a ferramenta mais adequada para cada aplicação.
Ante <i>et al.</i> , 2018	Indústria automóvel	FLI4.0	<i>Lean tools</i>	<i>I4.0 Techniques</i>	x	x	Útil na medição do desempenho produtivo. Permite identificar as relações entre os diferentes indicadores, de forma consistente com a melhoria operacional e o controlo do piso da loja.
Islas <i>et al.</i> , 2019	Fundição de alumínio	MI4.0		<i>Wireless sensors network (WSN), Internet of Things (IoT)</i>	x	x	Otimização de recursos e tempo de produção. Melhoria no tempo de resposta das intervenções de manutenção. Monitorização contínua do equipamento.
Moreira <i>et al.</i> , 2020	Ferramenta de moldagem por injeção	MI4.0		<i>Sensors, Predictive Maintenance</i>		x	Redução dos custos de manutenção. Diminuição das falhas e aumento do desempenho da ferramenta. Permite a implementação de rotinas de manutenção preventiva inteligentes.
Sahal <i>et al.</i> , 2020	Indústria ferroviária e eólica	MI4.0		<i>Open source, Big data Predictive Maintenance</i>	x	x	Aumento da disponibilidade e produtividade do sistema. Redução de custos.

Ruiz-Sarmiento <i>et al.</i> , 2020	Indústria de aço inoxidável	MI4.0	<i>Predictive Maintenance, Bayesian filter, Sensors, Cyber-Physical System (CPS), Internet of Things (IoT), Internet of Service (IoS), Big Data</i>	x		Melhoria no prognóstico do equipamento. Aumento do desempenho.
Alarcón <i>et al.</i> , 2021	Indústria química	MI4.0	<i>Enterprise Resource Planning (ERP), Energy management systems (EMS), Distributed control systems (DCS), Maintenance management systems (MMS)</i>	x		Melhoria no processo de tomada de decisão. Redução do consumo de energia.
Kiangala & Wang, 2018	Fábrica de engarrafamento	MI4.0	<i>Predictive Maintenance, Programmable logic controller, Sensors, Graphical user interface (GUI), Supervisory control and data acquisition (SCADA)</i>	x	x	Deteção precoce de falhas e determinação da manutenção a realizar-se automaticamente. Notificações instantâneas via e-mail.
Cusano & Napoletano, 2017	Indústria aeronáutica	MI4.0	<i>Visual recognition module</i>	x	x	Reconhecer e localizar várias peças mecânicas.
Langone <i>et al.</i> , 2020	Indústria química	MI4.0	<i>Interpretable Anomaly prediction (IAP)</i>	x	x	Previsão de uma falha que ocorre até uma hora antes. Redução de custos. Melhoria da manutenção.
Wang <i>et al.</i> , 2020	Suporte de serviço de máquinas de controlo numéricas de computador (máquinas CNC)	MI4.0	<i>Product-service system (PSS), Predictive Maintenance</i>	x	x	Monitorização do estado do equipamento em tempo real. Maior precisão para prever a vida restante do equipamento. Serviço com elevado valor acrescentado.
Aheleroff <i>et al.</i> , 2020	Eletrodomésticos	MI4.0	<i>Big Data, Internet of Things (IoT), Predictive Maintenance</i>	x	x	Criação de um produto inteligente de produtos e sistemas. Maior satisfação do cliente, personalização e eficiência energética. Melhoria de desempenho.
Magadán <i>et al.</i> , 2020	Laticínios	MI4.0	<i>Internet of Things (IoT), Multi-sensor modules, Single-board computer, Open-source software, Cloud computing, Big data</i>	x	x	Melhoria de desempenho. Monitorização de equipamentos, deteção de falhas. Redução de custos.

Einabadi <i>et al.</i> , 2019	Indústria automóvel	MI4.0		<i>Dynamic predictive maintenance, Artificial neural network, Sensors, Remaining useful life (RUL)</i>	x	x	Previsão da vida restante do equipamento. Redução de custos.
Novák <i>et al.</i> , 2020	Indústria aeronáutica	MI4.0		<i>Unmanned aerial vehicles (UAV)</i>		x	Melhor manutenção. Aumento da segurança da aviação e da eficiência económica.
Assad <i>et al.</i> , 2021	Montagem do módulo de bateria	MI4.0		<i>Cyber-Physical System (CPS), Virtual engineering (VE), Discrete Event Simulation (DES)</i>	x	x	Melhoria na tomada de decisões.
Baba, 2020	Setor energético	MI4.0		<i>Flying robot, Sensors, Convolutional neural network</i>	x	x	Inspeção, procedimentos de manutenção. Melhoria de desempenho, identificação de falhas.
Ebeid <i>et al.</i> , 2016	Terminal de contentores	MFL	Reverse-FMEA PDCA		x	x	Redução dos custos de manutenção preventiva, melhoria da eficiência do processo de manutenção.
Shou <i>et al.</i> , 2021	Indústria petrolífera e de gás	MFL	VSM 4D BIM		x	x	Melhoria na gestão de projetos, fluxo de trabalho e eficiência do processo produtivo.
Duran <i>et al.</i> , 2017	Indústria termoelétrica Caso 1: Oficina e armazém de peças sobressalentes Caso 2: desempenho das atividades de inspeção num conjunto de pulverizadores de carvão	MFL	<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FuzzyAHP)</i> Case 1: 5S Case 2: SMED		x	2	Escolha adequada da metodologia mais adequada para cada aplicação. Resolva as principais deficiências na função de manutenção, tornando-a mais eficiente.
Arslankaya & Atay, 2015	Indústria alimentar	MFL	5S Kaizen ERP			x	Informatização no âmbito da gestão, bom planeamento e agendamento de manutenção. Redução de falhas. Aumento do ciclo de vida do equipamento.
Serrou <i>et al.</i> , 2016	Logística	MFL	<i>Mathematical model</i>		x	x	Melhorar o desempenho da logística, organização. Redução de custos.

Shanmuganathan <i>et al.</i> , 2015	Indústria aeroespacial	MFL	<i>Life Usage Monitoring System (LUMS)</i>		x	Estima a vida operacional antes que ocorra uma falha potencial. Ajude o departamento de manutenção. Otimiza o tempo de inatividade da manutenção.
Poves-Calderno <i>et al.</i> , 2019	Indústria (plástico)	MFL	SMED OEE <i>Arena simulation software</i>	x	x	Redução do tempo de inatividade e tempo total de extrusão. Melhoria do OEE, eficiência do processo. Ordens cumpridas a tempo.
Pinto <i>et al.</i> , 2019	Indústria automóvel	MFL	SMED 5S OEE	x	x	Tempo de configuração reduzido. Melhoria na organização e limpeza do local de trabalho. Otimização do armazém e processos de produção.
Palmeira <i>et al.</i> , 2015	Indústria petrolífera	MFL	TPM 5S		x	Melhoria da gestão da manutenção. Uso eficiente de todos os recursos, tais como maior motivação, segurança e disciplina organizacional.
Abreu <i>et al.</i> , 2016	Infraestrutura	MFL	<i>Lean Building Maintenance (LBM) Maintenance Value Stream Mapping (MVSM)</i>	x	x	Gestão de manutenção de edifícios. Melhoria da intervenção de manutenção e qualidade. Cumprimento dos requisitos legais.
Pombal <i>et al.</i> , 2019	Gestão de oficinas de manutenção	MFL	<i>5S, Kanban, Visual management, Mizusumashi</i>		x	Redução de resíduos, no tempo necessário para localizar e repor material consumível. Melhor controlo de inventário e gestão de workshops.
Solano <i>et al.</i> , 2020	Indústria agrícola	MFL	<i>Mathematical model Response surface methodology (RSM) Principles of Lean manufacturing</i>	x	x	Melhoria da tomada de decisão. Redução de custos e resíduos. Otimização de recursos.

Martins <i>et al.</i> , 2020	Empresa de Soluções Energéticas	MFL	<i>Equipment classification method based on its criticality. Decision flowchart. Autonomous maintenance RCM</i>		x	Melhoria na gestão da manutenção.	
Fonseca-Junior <i>et al.</i> , 2015	Indústria termoeletrica	MFL	<i>Predictive Maintenance TPM (Education and Training, Specific Improvements, Autonomous Maintenance, Scheduled Maintenance)</i>		x	Identificação de possíveis causas de paralisações de equipamentos. Redução dos custos anuais de manutenção.	
Biedermann & Kinz, 2019	-	MFLI4.0	<i>Lean smart maintenance (LSM)</i>		x	Utilização e gestão de recursos de forma eficiente e sustentável. Gestão inteligente, eficiente e eficaz de ativos.	
Antosz <i>et al.</i> , 2020	-	MFLI4.0	<i>Lean tools</i>	<i>Artificial Intelligence (AI)</i>	x	Avaliar os resultados que uma determinada empresa pode esperar após a implementação de métodos e ferramentas magras na manutenção. Melhoria na tomada de decisões.	
Maier <i>et al.</i> , 2020	-	MFLI4.0	<i>Lean smart maintenance maturity model (LSM MM)</i>		x	3	Avaliação do nível de maturidade. Melhoria do sistema de gestão de decisões e manutenção.

Anexo B

Este Anexo fornece dados quanto à folha lição ponto a ponto, etiquetas utilizadas na Manutenção Autônoma, fluxograma que descreve o funcionamento do modelo (referente ao capítulo 4 e 5), assim como os Planos de Manutenção Autônoma e Manutenção Preventiva. Para além disso apresenta a tabela resumo com as 12 fases de implementação do TPM.

B.1. Etapas de Implementação da Metodologia TPM

Tabela B.1 – Doze etapas de implementação da metodologia TPM.

Preparação	Etapa 1 – Anúncio por parte da gestão de topo	1.1. Envolvimento de todos os elementos da empresa desde a Gestão de topo aos operadores. 1.2. Incentivar as atividades do TPM. 1.3. A Gestão de topo compromete-se em seguir o programa do TPM até à sua conclusão e consolidação.
	Etapa 2 – Programa de consciencialização e treino introdutório do TPM	2.1. O programa de consciencialização deve de permitir aos diversos colaboradores da empresa compreender o TPM quer em conceito e objetivos de modo a neutralizar todos os receios da sua implementação.
	Etapa 3 – Plano de implementação	3.1. Definir os membros que formaram o comitê de implementação do TPM. 3.2. Desenvolver e promover estratégias para a promoção do TPM. 3.3. Preparar o Plano Mestre TPM, coordenar a sua implementação, bem como a sua orientação e supervisão, organizar palestras sobre os vários temas importantes para consolidação do TPM, divulgar e organizar a publicação das informações.
	Etapa 4 – Estabelecer Políticas, Objetivos e Diretrizes para o TPM	4.1. Os objetivos do TPM devem de estar de acordo com os objetivos transversais da empresa e com os objetivos a médio e longo prazo. 4.2. A meta a longo prazo, a três anos, deve de ser bem estruturado e dividido, tendo metas intermediárias de modo a se poder avaliar a evolução da implementação do TPM. 4.3. Analisar e comparar os indicadores e metas financeiras atuais, ao longo da implementação e comprar com as previsões. 4.4. Divulgar o planeamento geral a toda a empresa, destacando as metas semanais, mensais e anuais de cada departamento.

	Etapa 5 – Elaborar o Plano Mestre	<p>5.1. O Plano Mestre deve de conter de forma detalhada todas as atividades e eventos para a correta implementação do TPM.</p> <p>5.2. O Plano Mestre deve de ser constantemente analisado e revisto. As atividades em atraso deveram de ser revistas e deve-se de elaborar um plano de contingência.</p> <p>5.3. As atividades do Plano Mestre devem de estar por ordem de prioridade.</p> <p>5.4. Todas as atividades que constam no Plano Mestre devem de estar devidamente orçamentadas, aprovadas e monitorizadas de modo a manter a sua implementação dentro dos tempos previstos, bem como o orçamento definido para estas.</p>
Introdução	Etapa 6 – Início do projeto	<p>6.1. Apresentar o Plano Mestre aos seus colaboradores bem como aos parceiros de negócio externos, assim como demonstrar a responsabilidade e comprometimento da sua implementação.</p> <p>6.2. Indicar oficialmente o início do projeto.</p>
Implementação	Etapa 7 – Implementar os Pilares Produtivos	<p>7.1. Pilar Melhoria Focada, as possíveis melhorias devem de ser identificadas e realizadas por equipas multifuncionais.</p> <p>7.2. Pilar Manutenção Autónoma. Com a implementação deste pilar o operador assume a responsabilidade do equipamento em que este trabalha. O operador deve de receber formação e treino.</p> <p>7.3. Pilar Manutenção Planeada, compreende as várias formas de manutenção (pós quebra, preventiva e preditiva). Controlar o tempo médio entre falhas.</p> <p>7.4. Pilar Formação e Treino, compreende todo o suporte formação e informação bem como a avaliação de cada operador de modo a medir o grau de conhecimento adquirido por este.</p>
	Etapa 8 – Implementar Pilar Gestão Precoce do Equipamento	8.1. Pilar Gestão Precoce do Equipamento, é considerado como projeto único as etapas que se inicia com o desenho do processo, o projeto básico do chão de fábrica e os planos e especificações incluindo o orçamento, fabrico, construção e o teste de funcionamento.
	Etapa 9 – Implementar Pilar Integração da Qualidade	9.1. Pilar Integração da Qualidade, permite a produção dentro das especificações e requisitos que o cliente pretende. As características da qualidade são influenciadas por quatro variáveis de produção: equipamentos, materiais, ações dos colaboradores (habilidade) e métodos.
	Etapa 10 – Implementar Pilar TPM na Administração	10.1. Consciencializar o departamento administrativo que é parte integrante do projeto e que é vital para dar suporte à produção bem como nas restantes áreas.

		<p>10.2. Reforçar as suas atividades e responsabilidade bem como melhorar a sua cultura de modo a evidenciar a importante interligação entre os vários departamentos.</p> <p>10.3. Melhorar processos administrativos, fluxo de informação, bem como os seus dispositivos de apoio (computadores, impressoras, etc.).</p>
	Etapa 11 – Implementar Pilar Segurança, Saúde e Ambiente	<p>11.1. Pilar Segurança, Saúde e Ambiente é tratado em todas as fases da implementação do TPM. Este pilar deve de ser amplamente implementado no chão de fábrica, bem como se deve de formar e informar os seus colaboradores para este assunto de modo a construir uma cultura sólida e coesa dentro da empresa.</p>
Consolidação	Etapa 12 – Consolidar as metas alcançadas e definir novas metas	<p>12.1. Monitorizar e avaliar constantemente o que se atingiu de modo a manter o que se alcançou.</p> <p>12.2. Encontrar mais desafios através de objetivos cada vez mais ambiciosos.</p> <p>12.3. Manter e reforçar o espírito de melhoria continua dentro da empresa.</p>

B.2. Folha Lição Ponto a Ponto

TPM	Lição Ponto a Ponto	Nº _____ Data: __/__/__
Tópico: _____ _____		
Categoria:	<input type="checkbox"/> Conhecimento geral <input type="checkbox"/> Problemas <input type="checkbox"/> Melhorias <input type="checkbox"/> Manutenção	<input type="checkbox"/> Operação <input type="checkbox"/> Ambiente <input type="checkbox"/> Segurança <input type="checkbox"/> Outros
Descrição: _____ _____ _____		
Instrutor: _____	Participante: _____	

Figura B.2 – Exemplo da Folha Lição Ponto a Ponto utilizada.

B.3. Plano de Manutenção Autónoma Desenvolvido para o Tapete Transportador

Autonomous maintenance plan			
Cleaning and Inspection Instruction			
Equipment identification		Equipment designation: Belt conveyor	
Code: 08.TT.04		Location: LP1	
Brand: MIME		Hour:	
Model: TT0.1			
Date:			
Note: Maintenance or inspection to be carried out with the equipment at: F-Function; S-Stopped;			
Actuation		Tool	Frequency
Electric Motor			
1 - Engine temperature inspection	F	Thermography	Weekly
2 - Engine operation noise inspection	F	Visual Inspection	Daily
3 - Inspection noise reducer operation	F	Visual Inspection	Daily
4 - Inspection of the condition of the structure's fastening	S	Visual Inspection	Weekly
5 - Engine cleaning	S	Compressed air gun	Weekly
Transmission set		Tool	Frequency
1 - Visual inspection of chain/sprockets condition	S	Visual Inspection	Daily
2 - Visual inspection of chain tension/alignment	S	Visual Inspection	Daily
3 - Lubricate bearings	S	Dough pump	Quarterly
4 - Mechanical assembly cleaning	S	Compressed air gun	Weekly
Power station		Tool	Frequency
Bearings			
1 - Bearing fixing inspection	S	Visual Inspection	Weekly
2 - Operating noise inspection	F	Visual Inspection	Daily
3 - Grease lubrication	S	Dough pump	Quarterly
4 - Inspection of the sprocket wheel	F	Visual Inspection	Daily
5 - General inspection of the state of the station	F	Visual Inspection	Daily
Tension station		Tool	Frequency
Bearings			
1 - Bearing fixing inspection	S	Visual Inspection	Weekly
2 - Operating noise inspection	F	Visual Inspection	Daily
3 - Grease lubrication	S	Visual Inspection	Quarterly
Tensioner wheel		Tool	Frequency
1 - Visual inspection of wheel condition	S	Visual Inspection	Weekly
2 - Wheel operation noise inspection	F	Visual Inspection	Daily
Tensioner		Tool	Frequency
1 - Visual inspection of the tensioners	F	Visual Inspection	Weekly
2 - Stretch inspection // parallelism	F	Visual Inspection	Weekly
Inductive sensor		Tool	Frequency
1 - General inspection	F	Visual Inspection	Weekly
Body		Tool	Frequency
Drag chain			
1 - Drag chain general inspection	F	Visual Inspection	Weekly
2 - Inspection of guides	F	Visual Inspection	Weekly
Gutters		Tool	Frequency
1 - Visual inspection of the condition of the side and back panels	F	Visual Inspection	Weekly
2 - Visual inspection of the condition of the covers	F	Visual Inspection	Weekly
3 - General inspection of the equipment	F	Visual Inspection	Weekly
Conveyor belt scraper		Tool	Frequency
1 - General inspection	F	Visual Inspection	Weekly
Electric system		Tool	Frequency
Power board			
1 - Condition inspection of relays, counters	F	Thermography	Weekly
2 - Inspection of push buttons	F	Visual Inspection	Weekly
Operator signature		Date:	
Observations:			

Figura B.3 – Plano de Manutenção Autónoma.

B.4. Etiquetas Utilizadas na Manutenção Autónoma

TPM - Intervenção (Manutenção)		TPM - Intervenção (Manutenção)	
Equipamento: __	Data de deteção: ____	Equipamento: __	Data de deteção: ____
Código: __	Localização: __	Código: __	Localização: __
Responsável pela deteção: __		Responsável pela deteção: __	
Descrição do problema:		Descrição do problema:	
Descrição da resolução:		Descrição da resolução:	
a)		b)	
Responsável pela deteção: __	Data de resolução: ____	Responsável pela deteção: __	Data de resolução: ____

Figura B.4 – a) Etiqueta vermelha técnico de manutenção.; b) Etiqueta azul operador.

B.5. Plano de Manutenção Preventiva Desenvolvido para o Tapete Transportador

Preventive Maintenance Plan			
Equipment identification		Equipment designation: Belt conveyor	
Code: 08.TT.04		Location: LP1	
Brand: MIME		Hour:	
Model: TT0.1			
Date:			
Note: Maintenance or inspection to be carried out with the equipment at: F-Function; S-Stopped;			
Actuation			Frequency
Electric engine	1 - Engine temperature inspection (Thermography)	F	Weekly
	2 - Temperature inspection of the gearbox	F	Weekly
	3 - Engine operation noise inspection	F	Daily
	4 - Inspection noise reducer operation	F	Daily
	5 - Inspection status/cleaning of gearmotor + fan	S	Weekly
	6 - Inspection status of gearmotor fastening	F	Monthly
	7 - Engine cleaning	S	Monthly
Transmission set	1 - Visual inspection of the bearings	F	
	2 - Visual inspection of bearings fixing	S	Weekly
	3 - Visual inspection of chain tension/alignment	F	Weekly
	4 - Inspection of the condition / fastening of the guard	F	Weekly
	5 - Grease lubrication	S	Biweekly
	6 - Mechanical assembly cleaning	S	Monthly
Power station			Frequency
Bearings	1 - Grease lubrication	S	Biweekly
	2 - Visual inspection of bearings fixing	F	Weekly
	3 - Operating noise inspection	F	Weekly
Drive wheel	1 - Visual inspection of wheel gear condition	S	Weekly
	2 - Wheel operation noise inspection	F	Daily
Tension station			Frequency
Bearings	1 - Grease lubrication	S	Biweekly
	2 - Visual inspection of bearings fixing	F	Weekly
	3 - Operating noise inspection	F	Daily
Tensioning wheel	1 - Visual inspection of wheel condition	S	Weekly
	2 - Wheel operation noise inspection	F	Weekly
Tensioner	1 - Visual inspection of the tensioners	F	Weekly
	2 - Stretch inspection // parallelism	F	Weekly
Inductive sensor	1 - Sensor operation inspection	F	Weekly
	2 - Visual inspection sensor protection	F	Weekly
Body			Frequency
Drag chain	1 - Drag chain general inspection	F	Daily
	2 - Inspection noise	S	Daily
	3 - Inspection of the state of the guides	S	Daily
Gutters	1 - Visual inspection of the condition of the side and back panels	S	Weekly
	2 - Visual inspection of the condition of the covers	S	Weekly
	3 - Inspection of the condition of the screws	F	Weekly
	4 - Inspection of equipment supports	F	Monthly
Scrapers	1 - Visual inspection scrapers	F	Weekly
Electric system			Frequency
Power Board	1 - Inspection of the condition of relays, counters (Thermography)	F	Weekly
Command Board	1 - Inspection of the condition of the terminals (Thermography)		Weekly
	2 - Inspection of the state of the pushbuttons		Weekly
Signature		Responsible Signature	
_____		_____	
(Maintenance technician)			
Date:		Date:	
Observations:			

Figura B.5 – Plano de Manutenção Preventiva.