

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES



METODOLOGIA KAIZEN-LEAN E INDÚSTRIA 4.0 NA MANUTENÇÃO

NUNO FILIPE GOMES MONTEIRO DE LIMA

novembro de 2019

METODOLOGIA *KAIZEN-LEAN* E INDÚSTRIA 4.0 NA MANUTENÇÃO

Nuno Filipe Gomes Monteiro de Lima

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e planeamento industrial

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Nuno Filipe Gomes Monteiro de Lima, Nº 1090429, 1090429@isep.ipp.pt

Orientação científica: Susana Cláudia Nicola de Araújo, sca@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e planeamento industrial

2019

Agradecimentos

Agradecer aos meus pais, irmã e namorada que acreditaram sempre em mim, apoiando e motivando-me sempre que sentia mais necessidade. Muito obrigado!

A todos os meus amigos que me acompanharam durante esta jornada, transmitindo-me sempre confiança.

À professora Susana Nicola por toda a disponibilidade, acompanhamento, conhecimento e motivação que sempre me transmitiu.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto que durante a minha vida académica não foi só a minha instituição de ensino, mas também a minha segunda casa.

À Arcen Engenharia S.A., particularmente o engenheiro Jorge Baptista, por toda a compreensão que sempre demonstrou durante a execução da dissertação.

Resumo

Fruto do aumento da competitividade a um nível global, as organizações sentem a necessidade cada vez maior de se destacarem focando-se assim na melhoria dos seus produtos e serviços, assim como na rapidez das entregas. Simultaneamente, a nível interno nas organizações, verifica-se um foco no aumento da eficiência da cadeia de valor, promovendo as atividades de acrescentam valor ao produto final e tentando simultaneamente eliminar ou reduzir aquelas que não agregam valor.

Este trabalho tem como objetivo principal aferir quanto à possibilidade de aplicação das metodologias *Kaizen-Lean* em conjunto com a Indústria 4.0, de forma a promover o aumento da eficiência da manutenção. Este tema surge uma vez que o aumento da eficiência da manutenção leva a um maior OEE, o que possibilita à produção ter os seus equipamentos a laborar nas condições devidas durante uma maior percentagem de tempo, levando assim a uma maior eficiência produtiva e conseqüentemente da cadeia de valor.

Foi aplicado um caso prático de implementação de interligação destas metodologias num motor problemático de uma organização, onde a manutenção era realizada de uma forma corretiva e o controlo do seu funcionamento era feito de forma esporádica no tempo. Desta forma, foi aplicado um sensor no equipamento, permitindo virtualmente observar continuamente a sua condição, permitindo assim promover a adoção da manutenção baseada na condição, eliminando assim desperdícios relacionados com a paragem da máquina devido ao incorreto funcionamento, aumentando assim a eficiência quer ao nível da manutenção quer ao nível da produção.

Palavras-Chave

Kaizen, Lean, Indústria 4.0, Desperdícios, Manutenção, Manutenção preventiva baseada na condição, Cadeia de valor.

Abstract

As a result of increasing competitiveness on a global level, organizations feel the growing need to distinguish by focusing on improving their products and services, as well their delivery times. At the same time, internally within organizations, there is a focus on increasing value chain efficiency by promoting value added activities to the product, while trying to eliminate or reduce those that do not add value.

This work aims to assess the possibility of applying *Kaizen-Lean* methodologies in conjunction with Industry 4.0, in order to promote increased maintenance efficiency. This has arisen since increased maintenance efficiency leads to a higher OEE, which enables production to have its equipment working under the proper conditions for a longer percentage of time, thus leading to greater production efficiency and hence the supply chain value.

A practical case of implementation of the connection of these methodologies was applied in a problematic engine of an organization, where the maintenance was performed on corrective mode and the control of its operation was done sporadically over time. In this way, a sensor was applied to the equipment, virtually allowing to observe constantly its condition, thus promoting the adoption of condition-based maintenance, thus eliminating waste related to machine shutdown due to malfunction, thus increasing efficiency at both maintenance and production.

Keywords

Kaizen, Lean, Industry 4.0, Waste, Maintenance, Preventive Maintenance Condition-Baser, Value chain.

Índice

| | |
|---|------------|
| AGRADECIMENTOS | I |
| RESUMO | III |
| ABSTRACT | V |
| ÍNDICE | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XI |
| ÍNDICE DE TABELAS | XIV |
| ACRÓNIMOS | XVI |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. ENQUADRAMENTO E RELEVÂNCIA DO TEMA..... | 1 |
| 1.2. OBJECTIVOS | 2 |
| 1.3. CALENDARIZAÇÃO | 3 |
| 1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO | 4 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 6 |
| 2.1. KAIZEN | 6 |
| 2.1.1. ORIGEM | 6 |
| 2.1.2. KAIZEN MANAGEMENT SYSTEM | 13 |
| 2.1.3. PRINCÍPIOS..... | 20 |
| 2.1.4. VALOR ACRESCENTADO E 3 MU'S | 22 |
| 2.1.5.7 MUDA | 23 |
| 2.1.6. FERRAMENTAS KAIZEN | 27 |
| 2.1.6.1. 5S | 27 |
| 2.1.6.2. NORMALIZAÇÃO E 5W2H | 28 |
| 2.1.6.3. FERRAMENTA 3C..... | 30 |
| 2.1.6.4. VALUE STREAM MAPPING E VALUE STREAM DESIGN | 31 |
| 2.1.6.5. KANBAN | 32 |
| 2.1.6.6. MIZUSUMASHI | 33 |
| 2.1.6.7. PLAN-DO-CHECK-ACT E STANDARDIZE-DO-CHECK-ACT | 34 |
| 2.1.6.8. OEE..... | 35 |
| 2.1.6.9. SINGLE MINUTE EXCHANGE OF DIE | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.6.10. <i>JIDOKA</i> E <i>POKA YOKE</i> | 37 |
| 2.2. <i>LEAN MANUFACTURING</i> | 38 |
| 2.3. INDÚSTRIA 4.0..... | 41 |
| 2.3.1. EVOLUÇÃO INDUSTRIAL | 41 |
| 2.3.2. PRINCÍPIOS DA INDÚSTRIA 4.0 | 45 |
| 2.3.3. PILARES DA INDÚSTRIA 4.0 | 46 |
| 2.3.3.1. <i>INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS</i> | 46 |
| 2.3.3.2. <i>CLOUD</i> | 47 |
| 2.3.3.3. <i>BIG DATA ANALYTICS</i> | 47 |
| 2.3.3.4. PRODUÇÃO ADITIVA | 47 |
| 2.3.3.5. ROBOTS AUTÓNOMOS..... | 48 |
| 2.3.3.6. <i>MANUFACTURING EXECUTION SYSTEM (MES)</i> | 48 |
| 2.3.3.7. SIMULAÇÃO..... | 49 |
| 2.3.3.8. SEGURANÇA INFORMÁTICA..... | 50 |
| 2.3.3.9. REALIDADE AUMENTADA..... | 50 |
| 2.3.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS..... | 52 |
| 2.3.4.1. VANTAGENS | 52 |
| 2.3.4.2. DESVANTAGENS | 52 |
| 2.4. MANUTENÇÃO | 54 |
| 2.4.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA E CONCEITO DE MANUTENÇÃO | 54 |
| 2.4.2. TIPOS DE MANUTENÇÃO | 57 |
| 2.4.3. CONCEITO DE FIABILIDADE | 58 |
| 3. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA <i>KAIZEN-LEAN</i> E INDÚSTRIA 4.0 NA MANUTENÇÃO..... | 63 |
| 3.1. CONCEITOS GERAIS DE MOTORES ELÉTRICOS..... | 63 |
| 3.1.1. VIBRAÇÃO NOS MOTORES ELÉTRICOS..... | 64 |
| 3.2. CASO PRÁTICO - ABORDAGEM <i>KAIZEN-LEAN</i> PARA AUMENTAR EFICIÊNCIA DE MANUTENÇÃO NUM MOTOR | 65 |
| 3.2.1. CASO..... | 66 |
| 3.2.2. CAUSA | 67 |
| 3.2.3. CONTRAMEDIDA | 69 |
| 3.2.3.1. APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO <i>WEG MOTOR SCAN</i> | 70 |
| 3.2.3.1.1. APLICAÇÃO PRÁTICA | 71 |
| 3.2.4. VERIFICAÇÃO DAS CONTRAMEDIDAS | 76 |
| 4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO..... | 80 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1. TRABALHOS FUTUROS | 82 |
| REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS | 84 |
| ANEXO A. VALORES DE VIBRAÇÃO RADIAL X MEDIDOS PELO WEG <i>MOTOR SCAN</i> | 91 |

Índice de Figuras

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Níveis <i>Kaizen</i> [60] | 10 |
| Figura 2 | <i>Kaizen</i> vs Inovação e a melhoria ao longo do tempo [30] | 12 |
| Figura 3 | <i>Kaizen Management System</i> [30] | 20 |
| Figura 4 | 3M [34] | 23 |
| Figura 5 | <i>Muda</i> [12] | 25 |
| Figura 6 | Relação entre os 7 <i>mudas</i> e as ferramentas <i>Kaizen</i> [29] | 27 |
| Figura 7 | Fabrico de mobiliário no século XVII [64] | 41 |
| Figura 8 | Fabrico de mobiliário no século XXI [16] | 41 |
| Figura 9 | Evolução industrial [32] | 43 |
| Figura 10 | Comunicação Indústria 4.0 [67] | 44 |
| Figura 11 | Demonstração de aplicação de Indústria 4.0 e seus impactos [4] | 45 |
| Figura 12 | <i>Industrial Internet of Things</i> [31] | 47 |
| Figura 13 | Nove pilares da Indústria 4.0 [4] | 51 |
| Figura 14 | Exemplo de representação da curva da banheira [17] | 60 |
| Figura 15 | Motor do ventilador de ar secundário | 66 |
| Figura 16 | Exemplo do rolamento danificado | 67 |
| Figura 17 | Análise de causas | 68 |
| Figura 18 | Modelo conceptual de implementação do sistema de monitorização | 71 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 19 | Instalação do sensor <i>Motor Scan</i> no motor da CR4 | 71 |
| Figura 20 | Fluxo de aquisição de dados [81] | 72 |
| Figura 21 | Vetores medidos da RMS do WEG <i>Motor Scan</i> [81] | 72 |
| Figura 22 | Menu de visualização do portal WEG IOT [80] | 73 |
| Figura 23 | Exemplo de níveis de criticidade [80] | 74 |
| Figura 24 | Vibração radial X a 02-04-2019 [80] | 75 |
| Figura 25 | Vibração radial X a 03-04-2019 [80] | 76 |

Índice de Tabelas

| | | |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | Cronograma do projeto | 4 |
| Tabela 2 | Diferenças entre perspectiva <i>Kaizen</i> e inovação | 11 |
| Tabela 3 | Limites dos níveis de alerta e dos níveis críticos de vibração [81] | 74 |
| Tabela 4 | Comparação dos valores de vibração medidos | 77 |

Acrónimos

| | | |
|--------|---|--|
| BOM | – | Bill of Material |
| CR4 | – | Caldeira de recuperação 4 |
| ERP | – | Enterprise Resource Planning |
| IDM | – | Innovation and Development Management |
| IOT | – | Internet of Things |
| JIT | – | Just-In-Time |
| KCM | – | Kaizen Change Management |
| KMS | – | Kaizen Management System |
| KPI | – | Key Performance Indicator |
| MES | – | Manufacturing Execution System |
| MTBF | – | Mean Time Between Fail |
| MTTF | – | Mean Time to Failure |
| MTTR | – | Mean Time Till Repair |
| OEE | – | Overall Efficiency Equipment |
| PDCA | – | Plan – Do – Check - Act |
| PLC | – | Programmable Logic Controller |
| PQCDSM | – | Productivity, Quality, Cost, Delivery, Safety and Morale |
| QDC | – | Quality, Cost and Delivery |

- QCDM – Quality, Cost, Delivery and Motivation
- RCM – Reliability Centered Maintenance
- RMS – Root Mean Square
- SDCA – Standardize – Do – Check – Act
- SMED – Single Minute Exchange of Die
- TFM – Total Flow Management
- TPM – Total Productive Management
- TPS – Toyota Productive System
- TQM – Total Quality Control
- TSM – Total Service Management
- VSD – Value Stream Design
- WIP – Work In Progress

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E RELEVÂNCIA DO TEMA

A globalização que se faz sentir a nível económico, financeiro, cultural e político tornaram o mercado cada vez mais competitivo, levando a uma mudança drástica na forma como as organizações valorizam a importância da sua cadeia de valor, contribuindo deste modo para que as mesmas invistam cada vez mais na automação e na aplicação de metodologias de otimização de processos. Esta aposta permite simultaneamente uma redução dos custos produtivos e da sua cadeia de abastecimento, assim como uma maior capacidade de flexibilização dos fluxos de produção.

As metodologias de melhoria contínua baseiam-se na identificação das atividades que agregam valor ao produto final, sendo que as atividades que não possuem valor acrescentado são classificadas como desperdícios, devendo ser eliminadas e quando tal não é possível reduzi-las. Focadas na melhoria contínua, eliminação de desperdícios e a

otimização dos processos produtivos surgem metodologias como o *Kaizen* [28] e o *Lean Manufacturing* [83]. Ambas as metodologias têm como objetivo aumentar a eficiência relacionada com a produção, assim como de outros departamentos, tais como, compras, logística e manutenção. Tal é lógico, uma vez que garantindo que a manutenção é efetuada de uma forma eficiente, isso significa que um dado equipamento ou sistema terá uma maior disponibilidade produtiva, levando a que a organização atinja melhores resultados. Relativamente à manutenção, inicialmente as organizações recorriam à manutenção corretiva, contudo, tendo como objetivo o aumento da eficiência produtiva, as mesmas têm adotado políticas de manutenção de carácter proativo, como por exemplo a manutenção preventiva (baseada na condição ou na fiabilidade), de forma a garantir uma maior fiabilidade e *Overall Efficiency Equipment (OEE)* dos equipamentos produtivos [39].

Por outro lado, surge a Indústria 4.0, que tem como visão e objetivo o desenvolvimento de fábricas inteligentes, compostas por sistemas modulares, nos quais os sistemas cibernéticos são responsáveis pela monitorização em tempo real dos processos que ocorrem [78]. A monitorização dos processos pode ser efetuada sob o ponto de vista produtivo como também pelo de manutenção, promovendo uma relação de interoperabilidade entre estes departamentos devido à sua relação forte de dependência.

Deste modo, o presente relatório, descreve o trabalho desenvolvido ao nível de investigação e implementação da metodologia *Kaizen-Lean* em consonância com a Indústria 4.0, por forma a promover o aumento da eficiência da manutenção.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a associação da metodologia *Kaizen-Lean* em conjunto com a Indústria 4.0, como forma de potenciar os resultados de manutenção, recorrendo para isso a algumas das suas ferramentas e pilares.

Para o objetivo proposto ser alcançado, foi necessário definir objetivos específicos:

- I. Identificar e caracterizar as principais metodologias de melhoria contínua e eliminação de desperdícios;
- II. Identificar os principais motivos de desperdícios, sejam eles de produção ou de manutenção;
- III. Caracterizar a Indústria 4.0, os seus princípios e pilares;
- IV. Identificar os objetivos da manutenção, as suas tipologias e a sua relação com o conceito de fiabilidade de equipamentos;

1.3. CALENDARIZAÇÃO

Para atingir os objetivos propostos foram definidas as seguintes etapas (Tabela 1):

- I. Realizar um estudo através da revisão bibliográfica, analisando as diferentes metodologias de melhoria de processos, neste caso *Kaizen* e *Lean*, assim como o estudo da Indústria 4.0, mais particularmente os seus princípios e pilares e, por fim, a manutenção, nomeadamente os seus objetivos e a sua interligação com o conceito de fiabilidade;
- II. Contextualizar o caso de estudo, onde são apresentados os conceitos gerais de motores elétricos e o carácter da vibração como medida de controlo de funcionamento destes equipamentos para efeitos de manutenção.
- III. Análise do caso de estudo através da aplicação de uma das ferramentas *Kaizen*, neste caso a 3C, onde foi feita a avaliação do caso, das causas, das potenciais contramedidas e a verificação da contramedida implementada;
- IV. Implementação da solução de monitorização contínua da vibração do motor, tendo como por base a Indústria 4.0 e a mudança do paradigma de manutenção, passando de corretivo para manutenção baseada na condição;

- V. Comparação dos valores de vibração medidos pelo sensor e pelo departamento de manutenção, por forma a garantir a fiabilidade do sistema proposto.

Tabela 1 Cronograma do projeto

| Nº Etapa | Nome etapa | Início | Fim | Março | | | Abril | | | Junho | | | Julho | | | Agosto | | | Setembro | | | Outubro | |
|----------|--|------------|------------|---------|---------|--------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | | | 29 - 31 | 01 - 07 | 8 - 13 | 30 | 01 - 07 | 08 - 14 | 15 - 21 | 22 - 28 | 29 - 31 | 01 - 04 | 05 - 11 | 12 - 18 | 19 | 20 - 25 | 26 - 31 | 01 - 03 | 04 - 08 | 09 - 15 | 16 - 22 | 23 - 29 |
| 1 | Aplicação do sensor e registo das medições | 29/03/2019 | 13/04/2019 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Estudo Indústria 4.0 | 30/06/2019 | 14/07/2019 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Estudo Manutenção | 15/07/2019 | 21/07/2019 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Estudo Kaizen | 22/07/2019 | 19/08/2019 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Estudo Lean | 20/08/2019 | 03/09/2019 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Desenvolvimento do modelo conceptual do caso prático | 04/09/2019 | 30/09/2019 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Elaboração do relatório | 01/07/2019 | 06/10/2019 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

A estrutura desta dissertação foi construída tendo como base os objetivos previamente definidos e apresentação:

- I. O capítulo 1 contém a contextualização do problema, os objetivos do estudo e a estrutura da dissertação;
- II. O capítulo 2 inclui o estado da arte, contendo os conceitos fundamentais dos temas chave da presente dissertação, sendo eles o *Kaizen* e *Lean* (e as ferramentas a eles associadas), assim como a Indústria 4.0 e a manutenção;
- III. O Capítulo 3 apresenta a implementação do caso prático, neste caso a aplicação de ferramentas *Kaizen* e da Indústria 4.0 para a resolução de problemas na manutenção, onde foi aplicado um sensor para monitorização da sua condição. O trabalho de implementação do sensor no motor e o registo dos valores de vibração foram efetuados no âmbito de um trabalho de grupo para uma unidade curricular do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, apesar de não ter sido feita na altura a associação entre a sua implementação e o seu relacionamento com a metodologia *Kaizen-Lean*;
- IV. O capítulo 5 inclui as principais conclusões desta dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 KAIZEN

2.2.1 Origem

Com o término da II Guerra Mundial, as empresas japonesas fortemente fustigadas pelos acontecimentos para conseguirem manter-se no mercado e fazer face às solicitações dos clientes, necessitaram de procurar, desenvolver e sustentar a melhoria a cada dia, surgindo deste modo a metodologia *Kaizen*. Este termo e consequentemente metodologia chave na gestão começou a ser globalmente aceite a partir de 1986, ano no qual foi publicado o livro *Kaizen The Key to Japans Competitive Sucess* [28].

Masaaki Imai, conhecido como o criador do *Kaizen* estudou na Universidade de Tóquio e trabalhou na Toyota durante vários anos [69], tendo vivido nos Estados Unidos da América durante cinco anos na década de 50, onde trabalhou para o centro de produtividade japonesa em Washington. Assim, em 1962 Masaaki Imai fundou a Cambrige Corporation, desenvolvendo o seu trabalho na área da consultoria e fundou o Kaizen Institute em 1986, com o objetivo de incorporar os conceitos *Kaizen* nas organizações do mundo ocidental. Ainda em 1986, Masaaki Imai dá um passo importantíssimo na consolidação da metodologia *Kaizen* ao ser introduzida na empresa Toyota, tendo como objetivos principais a melhoria da eficiência, produtividade e consequentemente a competitividade. Este contacto que Masaaki Imai teve com o mundo ocidental e oriental permitiu-lhe extrair o melhor dos dois mundos [47]:

- Através dos diversos estudos que desenvolveu sobre a produtividade americana, conseguiu perceber que os métodos adotados se baseavam essencialmente na procura de inovação com uma grande componente tecnológica, recorrendo a elevados investimentos financeiros e ao recurso a equipas de elevado conhecimento de engenharia;
- Através do seu conhecimento das empresas orientais, particularmente as japonesas, apercebeu-se que os métodos utilizados para aumentar a produtividade eram, essencialmente, baseados na procura de incentivar e envolver os colaboradores das organizações na procura de melhorias que necessitassem de um investimento financeiro reduzido.

A palavra *Kaizen* resulta da junção de 2 palavras distintas: *kai* que significa mudar e *zen* que significa melhor, ou seja, mudar para melhor [68]. “A existência do *Kaizen* é simples e direta: *Kaizen* significa uma melhoria contínua envolvendo todos, inclusive gestores e operários. A filosofia do *Kaizen* afirma que o nosso modo de vida – seja no trabalho, na sociedade ou em casa – merece ser constantemente melhorado” [27]. O termo *Kaizen* pode ser simultaneamente enquadrado e aplicado como filosofia de melhoria continua e como uma metodologia de aplicação. Esta filosofia rege-se pela eliminação de desperdícios, no uso de soluções de baixo custo e exequíveis, que sejam sustentadas pela

motivação e criatividade dos colaboradores, com o intuito de melhorar continuamente a eficiência dos processos [6].

A metodologia *Kaizen* tem como objetivo primordial na sua implementação a melhoria dos resultados da organização, sendo que para isso atua nas áreas da qualidade, custo e entrega – modelo *Quality, Cost and Delivery* (QCD) [30]. Também de referir que poderemos adicionar o tópico de motivação, referindo desta forma ao modelo *Quality, Cost, Delivery and Motivation* (QCDM) [30]. No que diz respeito à qualidade, esta está diretamente relacionada com a satisfação do cliente, assim sendo, quanto maior forem os índices de qualidade de uma organização, maior será a satisfação dos seus clientes. Em relação ao custo, este refere-se ao custo total de um dado produto ou serviço, englobando todas as suas fases: prototipagem, produção e comercialização, sendo que neste caso o objetivo na metodologia é diminuir este valor o máximo possível, não comprometendo outros fatores. A entrega diz respeito ao cumprimento dos prazos estipulados para com o cliente e a motivação associa-se à forma com que os colaboradores da organização veem e efetuam as suas tarefas, não esquecendo que quanto maior a motivação de um colaborador, maior será o seu desempenho [30].

Para que o modelo QCD possa ser corretamente implementado e mantido, Imai em 1986 apontou três pontos chave [24]:

- I. *Everybody* – O envolvimento de todos os colaboradores da organização consegue quebrar aquilo de pode-se designar como barreiras hierárquicas, promovendo assim a melhoria e inovação. É defendido que sejam construídas equipas multidisciplinares, para poderem ser mais hábeis e ágeis para a diversidade de problemas que surgem. Envolvimento e equipas multifacetadas são fatores chave para atingir os objetivos definidos, não só com eficácia, mas acima de tudo eficiência;
- II. *Everyday* – a metodologia *Kaizen* deve ser implementada e alimentada todos os dias, para que esta se torne uma rotina de melhoria contínua e não um caso esporádico;

- III. *Everywhere* – todas as áreas e departamentos podem e devem inculir esta metodologia, uma vez que esta tem um carácter transversal e possibilita a obtenção de resultados independentemente do meio onde possa ser implementada.

Em 1990, Masaaki Imai reforça nove tópicos importantes a serem tidos como cruciais na metodologia *Kaizen* [25]:

- I. O desperdício tem um efeito severo nos resultados nas organizações, sendo que deve ser foco principal a sua eliminação;
- II. As melhorias devem ser introduzidas de forma gradual e continuamente e não de uma forma intermitente;
- III. Todos os colaboradores devem estar envolvidos na implementação e manutenção desta metodologia, independentemente no nível hierárquico;
- IV. As ações a implementar devem ter o menor custo possível, dado que o aumento da produtividade deve ser realizado, idealmente, sem recurso a investimentos significativos;
- V. O *Kaizen* pode e deve ser aplicado em todas os departamentos e áreas das organizações, assim como em qualquer região geográfica, tendo um carácter transversal;
- VI. Apresenta a gestão visual como uma ferramenta vital, usufruindo da mesma para tornar possível que os problemas e desperdícios possam ser vistos por todos;
- VII. Foco da metodologia no local – *Gemba* - onde se acrescenta valor a um dado produto ou serviço;
- VIII. Orientação para os processos;
- IX. As pessoas são vistas como prioridade na organização, sendo que o esforço principal da melhoria deverá advir de uma mentalidade nova e estilo de trabalho das pessoas, isto é, estarem consciencializados para a qualidade, trabalho em

equipa, gosto por adquirir novos conhecimentos, autodisciplina, autodidatas e papel proativo em sugerir possíveis melhorias.

É possível verificar que podemos dividir o *Kaizen* em dois níveis distintos: *Kaizen* de fluxo ou sistema e *Kaizen* de processo [60]. O primeiro tem como foco principal o fluxo de valor, dirigido assim para níveis hierárquicos superiores da organização, ao passo que o *Kaizen* de processo tem como maior foco os processos individuais e respetiva eliminação do desperdício, dirigido às equipas de trabalho efetivo e seus líderes (Figura 1).

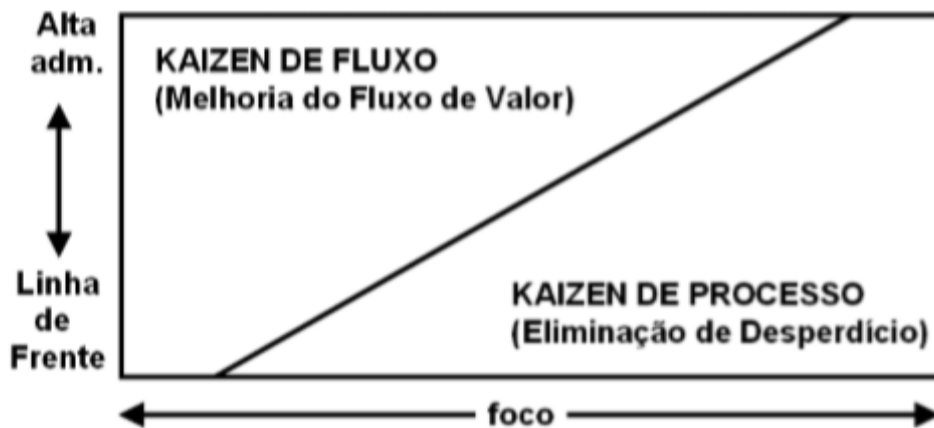


Figura 1 Níveis *Kaizen* [60]

Imai em 1992 [26] ressaltou que o foco pelo progresso de uma organização pode ser efetuado de duas formas distintas: através da metodologia *Kaizen* com um trabalho e resultados graduais ou através da inovação, caracterizada pela sua periodicidade esporádica no tempo assim como os seus resultados. Estas filosofias apresentam comportamentos diferentes em relação a determinadas características, tais como efeito, ritmo, prazo, mudança, nível de envolvimento, foco, metodologia, requisitos práticos, orientação, critério de evolução, vantagem e estímulo (Tabela 2).

Tabela 2Diferenças entre perspectiva *Kaizen* e inovação

| | KAIZEN | INOVAÇÃO |
|----------------------|--|---|
| Efeito | Longo prazo | Curto prazo |
| Ritmo | Pequenos progressos | Grandes progressos |
| Prazo | Contínuo | Intermitente |
| Mudança | Gradual e constante | Repentina e momentânea |
| Envolvimento | Global | Partidário |
| Foco | Coletivo, com carácter sistémico | Assinalável individualismo e esforços individuais |
| Metodologia | Manutenção e melhoria | Refugo e retrabalho |
| Requisitos práticos | Exige pouco investimento financeiro, mas um grande esforço para o manter | Exige grande investimento financeiro, mas pouco esforço para o mantel |
| Orientação | Pessoas | Tecnologia |
| Critério de evolução | Processos e esforços com vista à obtenção de melhores resultados | Resultados por lucros |
| Vantagem | Mais adequado para organizações inseridas em economia de crescimento lento | Adapta-se melhor a organizações inseridas em economia de crescimento rápido |
| Estímulo | <i>Know-How</i> e atualização do estado da arte | Avanços tecnológicos e novas teorias |

Deste modo, é possível concluir que o *Kaizen* tem um carácter gradual quer na sua implementação como nos resultados a ele associados, podendo alcançar índices de melhoria mais elevados em função do tempo comparativamente a uma organização que só se baseie no fator inovação (Figura 2). Ao contrário da inovação o foco do *Kaizen* é nas pessoas e não na vertente tecnológica, possibilitando assim um investimento mais reduzido. Para além disso é importante referir que a implementação dessa metodologia é sistémica na organização e não de uma forma individual.

Por outro lado, nenhuma destas metodologias é errada, tem é de ser enquadradas nos cenários corretos para conseguir-se obter o maior ganho possível na sua implementação.

Ao nível da implementação do *Kaizen*, tal como é possível observar na Figura 2, verifica-se a diferenciação de tipologias de *Kaizen* que têm objetivos diferentes [30]:

- I. Diário – ênfase no desenvolvimento das equipas;
- II. Projeto – foco no desenvolvimento de processos;
- III. Suporte – prioridade no desenvolvimento da motivação.

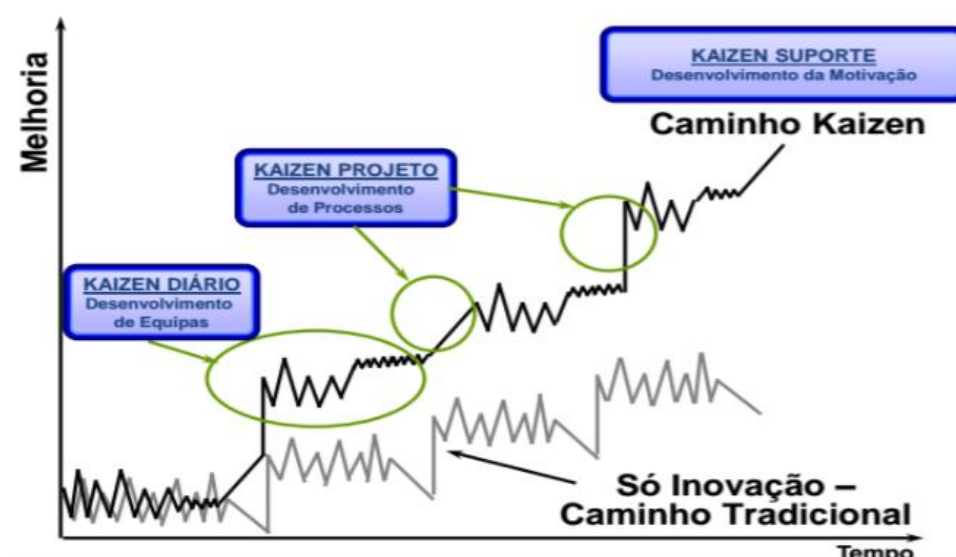


Figura 2 *Kaizen* vs Inovação e a melhoria ao longo do tempo [30]

2.1.2 *Kaizen Management System*

O *Kaizen Management System* (KMS) representa a forma como o *Kaizen Institute* possui a sua abordagem bem estruturada, apresentado assim tanto aos clientes como aos potenciais uma estratégia e base de atuação bem delineada [30]. O KMS é assim o modelo geral que incorpora as metodologias, conceitos, ferramentas e princípios que são necessários para a implementação e manutenção de um sistema de melhoria contínua numa organização, com vista a alcançar um nível de excelência operacional e criar valor com vista de longo prazo para a organização, recorrendo para isso à metodologia *Lean Management* [30].

O KMS é dividido em quatro blocos distintos, mas com um elevado grau de relacionamento e interdependência (Figura 3):

- I. Princípios e valores – têm como objetivo a construção de fundações sólidas nos fundamentos *Kaizen*, criando e fomentando o modo de pensar em melhoria contínua. Os princípios e os valores são desta forma o *Kaizen Foundations*, que tal como referido anteriormente, tem como um dos objetivos primordiais a eliminação do *Muda* quer seja por desperdício quer seja por perda;
- II. Organização e implementação de um sistema *Kaizen-Lean* – define o modo de operação das ferramentas *Lean* que vão ser utilizadas, representando assim o *Kaizen Change Management* (KCM). O KCM tem como missão a definição clara das diretrizes para a aplicação do modelo KMS e agiliza a gestão pessoal, parte importantíssima para que seja possível quebrar barreiras e paradigmas;
- III. Iniciativas *Kaizen-Lean* – define quais as ferramentas *Lean* que irão ser aplicadas, sendo constituída pelos 5 pilares do *Kaizen*: *Total Flow Management* (TFM), *Total Productive Management* (TPM), *Total Quality Control* (TQM), *Total Service Management* (TSM) e *Innovation and Development Management* (IDM);
 - a. *Total Flow Management* – este pilar trata-se de uma ferramenta de gestão que engloba a totalidade das atividades de fluxo, quer de informação quer de material, logística e produção, tendo como objetivo que o fluxo de

informação e de materiais flua de uma forma mais rápida, autónoma e eficiente, através da análise e transformação dos processos existentes. Esta ferramenta foi a primeira a ser desenvolvida e pode ser decomposta em 5 níveis. O primeiro designa-se de *Kaizen* diário e é elaborado pelas equipas multidisciplinares tendo como objetivo garantir a manutenção da estabilidade do processo. O segundo nível é relativo à otimização do fluxo produtivo, tendo como foco o *layout* da linha produtiva, assim como a normalização das operações. O terceiro nível engloba das atividades de logística interna, tendo assim o objetivo de otimizar o fluxo de materiais dentro da organização, através de várias ferramentas e metodologias como o *Mizusumashi*, regulação do nível de stocks, *Pull Planning* (planeamento operacional é realizado através da procura do produto pelo cliente) e sincronização das compras com o sistema produtivo [74]. O quarto nível é respeitante à logística externa, tendo desta forma como objetivo que a aquisição de materiais e matérias primas aos fornecedores seja rápida. Para tal ser alcançado são utilizados como recursos a otimização do *layout* dos armazéns, a utilização do *Milkrun*, um planeamento global com base em *pull* e a definição do *Inbound/Sourcing* e *Outbound/Delivering*. O quinto e último nível diz respeito ao *Value Stream Mapping* (VSM) onde é efetuado o mapeamento do fluxo de material e informação da organização, que será abordado com mais pormenor na classe das ferramentas utilizadas nesta metodologia [30].

- b. *Total Productive Management* – este pilar trata-se de uma ferramenta que tem como objetivo primordial a procura pela perfeição produtiva, sendo de destacar que é utilizada em maior escalada em empresas cujos processos produtivos sejam contínuos. Trata-se assim de uma abordagem holística para a manutenção de equipamentos, tendo como objetivo a produção de excelência, sem avarias nos equipamentos, com um índice de qualidade excepcional (zero defeitos), sem pequenas paragens e valorizando a higiene e segurança no trabalho, aumentando desta forma a qualidade e permitindo simultaneamente a redução dos custos produtivos. Assim

sendo, a utilização da metodologia TPM tem como objetivo o aumento do OEE. A filosofia TPM define que todos os colaboradores de produção e manutenção são envolvidos em todas as atividades com o intuito de eliminar acidentes, defeitos e falhas de equipamentos, sendo que estas atividades são efetuadas enquanto a produção é contínua, cabendo à manutenção manter o bom funcionamento dos equipamentos [56]. Esta atitude de cooperação entre os departamentos de produção e de manutenção possibilita planejar as atividades de manutenção, por forma a determinar-se o momento ideal para as efetuar, diminuindo deste modo as perdas de produção e, simultaneamente, as ações de manutenção corretiva [56]. Esta abordagem tem como sustentação ferramentas como os 5'S, ferramenta *Lean* que tem como um dos objetivos a limpeza e organização do *Gemba*.

Nakasato em 1994 destacou que a implementação do TPM na indústria acarreta várias vantagens, tais como [48]:

- I. Aumento do grau de confiança, cooperação entre os colaboradores;
- II. Locais de trabalho melhor organizados, limpos e arrumados;
- III. Incremento de uma atitude proativa nos colaboradores;
- IV. Alcance dos objetivos tendo como base o trabalho de equipa;
- V. Aumento de cooperação entre todas as áreas da organização;
- VI. Partilha de conhecimento entre colaboradores e departamentos;
- VII. Sentimento de posse dos colaboradores face aos equipamentos.

Em 2000, Shirose identificou as perdas que o TPM tem como objetivo eliminar:

- I. Perdas por avaria acidental e inesperada;

- II. Perdas por mudança do produto, levando ao incremento de tempo de *setup*;
- III. Perdas decorrentes de moldes e ferramentas utilizados no processo produtivo que já não se encontram nas condições exigidas;
- IV. Perdas devido a pequenas paragens em que a linha produtiva funciona sem carga;
- V. Perdas oriundas da quebra da cadência produtiva, aumentando assim o tempo de ciclo;
- VI. Perdas devido a produtos com anomalias;
- VII. Perdas decorrentes da deteção de produtos com defeitos;
- VIII. Perdas de arranque dos equipamentos da linha produtiva.

Nakasato em 1994 referiu que a implementação da metodologia TPM possibilita benefícios em seis dimensões distintas *Productivity, Quality, Cost, Delivery, Safety and Morale* (PQCDSM) [48]. Nakasato defende que tem de se verificar um equilíbrio entre as diferentes dimensões: os custos têm de estabelecer uma boa relação com a qualidade, a produção tem de ser eficiente para cumprir os prazos de entrega e a produção tem de ter uma boa relação com os custos. Tal é importantíssimo porque de nada interessa à organização possuir uma boa capacidade produtiva se os seus custos e, conseqüentemente, preços forem superiores à concorrência, assim como ter uma boa qualidade geral dos produtos, mas não os entregar nos prazos de entrega estipulados. Assim sendo, o equilíbrio entre as seis dimensões é basicamente o que determina qual o nível de produtividade e os resultados da organização.

A implementação da metodologia TPM, que tem como objetivo o aumento do rendimento global da empresa e a redução dos seus custos, tem como base oito pilares que se encontram num sistema integrado de gestão e estão diretamente relacionados com as seis dimensões [24]:

- I. Manutenção autónoma – foca-se na criação e estabelecimento de rotinas de manutenção de equipamentos realizada pelos operadores de produção, com o objetivo de eliminar a origem de determinadas falhas e de identificar pequenas falhas que poderiam provocar falhas de escala maior;
 - II. Manutenção planeada – possibilita diminuir o tempo de manutenção do equipamento, aumentando assim o OEE do mesmo;
 - III. Qualidade – tem como objetivo a prevenção e deteção de erros nos equipamentos, eliminando as origens dos defeitos reduzindo assim os custos;
 - IV. Treino e formação – formar e treinar os operadores de produção e manutenção fornecendo o conhecimento e ferramentas necessárias para atingirem os objetivos do TPM;
 - V. Segurança e ambiente – promover um ambiente de trabalho seguro através da eliminação de fatores de risco, centrando-se em atividades de prevenção de acidentes de equipamentos, ambientais e pessoais;
 - VI. Gestão antecipada – o conhecimento empírico do equipamento durante o TPM, permite a sugestão de melhorias de *design* de funcionamento de novos equipamentos ou alteração dos atuais;
 - VII. *Kobetsu Kaizen* – identificar as principais perdas da organização e focar em eliminá-las;
 - VIII. *Kaizen Office* – melhorar a eficiência dos processos administrativos, com vista ao aumento da eficiência e redução das perdas a eles associados.
- c. *Total Quality Control* – representa o envolvimento e o esforço da organização para melhorar os índices de qualidade em todos os níveis, tendo como máxima “*Do the right things, right first time, everytime*” [23].

O TQM funciona assim como uma ferramenta de gestão integrada que serve de apoio e base para possibilitar a melhoria de diferentes tópicos como o envolvimento dos colaboradores naquilo que é a organização e qual o seu papel, as necessidades e conseqüentemente as expectativas dos clientes, o foco na melhoria do processo e conseqüentemente a redução dos níveis de *reworks*. Esta ferramenta tem como objetivo a implementação de ações de melhoria em cinco níveis. O nível 0 é relativo aos defeitos no produto que chegam ao cliente, acontecendo imediatamente antes de o produto ser entregue ao cliente final, gerando assim uma reclamação e o reprocessamento da encomenda. No nível 1 os defeitos já não são possíveis de chegar ao cliente, uma vez que foi implementada uma ação de melhoria no nível 0 que é o controle de qualidade imediatamente antes da entrega do produto ao cliente final. Assim, é possível garantir um controle de qualidade total do produto, impossibilitando que um produto com defeitos chegue ao cliente final. No nível 2, há o claro foco na redução dos defeitos, sendo que para isso são resolvidos problemas de uma forma estruturada, podendo utilizar o *Kobetsu Kaizen*, que se trata de uma ferramenta de resolução de problemas, tendo como foco a identificação e eliminação dos desperdícios, baseando-se em princípios de melhoria contínua. O nível 3 diz respeito ao isolamento dos defeitos, sendo que para isso é implementado um controle de qualidade em cada uma das operações que fazem parte do sistema produtivo, recorrendo para isso a matrizes de auto-qualidade e de implementação de projetos *Six Sigma*, que trata-se de um método eficiente para a redução da variabilidade do processo, reduzindo desta forma os defeitos no processo produtivo, sendo muito utilizado para a resolução de problemas [24].

- d. *Total Service Management* – trata-se da adaptação das ferramentas utilizadas no TPM para áreas de negócios de serviços, tais como a banca, educação, governo, entre outros. Para isso, inicialmente, é elaborado o mapa da cadeia de valor dos serviços que são prestados relativos a uma

dada organização, tendo como objetivo procurar e posteriormente reduzir, se possível eliminar, os desperdícios (*mudas*). É também elaborado o mapeamento do processo, sendo que posteriormente são implementadas ações de *Kaizen*, tais como o *Kaizen* diário, através da organização das equipas existentes, implementação de 5'S, normalização de processos e trabalho e uma gestão mais eficiente de arquivos e stocks [30].

- e. *Inovation and Development Management* – é uma ferramenta utilizada pelo *Kaizen*, tendo como objetivo apoiar, sustentar e melhorar a gestão da inovação assim como o desenvolvimento dos projetos, sendo uma ferramenta de elevada importância principalmente na fase inicial de projetos de desenvolvimento de novos produtos e metodologias [30]. Para tornar mais fácil e eficiente a implantação do KCM, são utilizados como recursos três níveis de *Kaizen*. O nível 1 diz respeito ao *Kaizen* diário que está fundamentalmente associado à melhoria de processos diários, assim como a normalização dos procedimentos e normas de trabalhos das equipas. Estas equipas são compostas por um grupo de colaboradores que executam a mesma função na organização, que seguem e avaliam as atividades diárias. O *Kaizen* diário é assim um passo crucial, uma vez que é responsável pela construção dos alicerces e enraizamento da cultura *Kaizen* e envolve a grande maioria dos colaboradores da empresa. Já o nível 2 do *Kaizen* é relativo ao *Kaizen* projeto, consistindo, usualmente no desenvolvimento de processos através na introdução de fatores de inovação nos mesmos e envolvendo equipas multidisciplinares. O terceiro nível do *Kaizen* trata-se do *Kaizen* de suporte, tendo como objetivo suportar os outros níveis, através da realização de auditorias que controlam se os objetivos inicialmente propostos estão a ser cumpridos e simultaneamente motivar os colaboradores [30].

- IV. Missão *Kaizen-Lean* – estabelece objetivos e os *Key Performance Indicator* (KPI), sendo que a implementação da metodologia *Kaizen-Lean* visa o desenvolvimento das pessoas, o sucesso financeiro da organização, melhoria de processos e criação

de valor para o cliente e, de notar, que todo este processo deve englobar quem interage com a organização, ou seja, os fornecedores e os clientes.

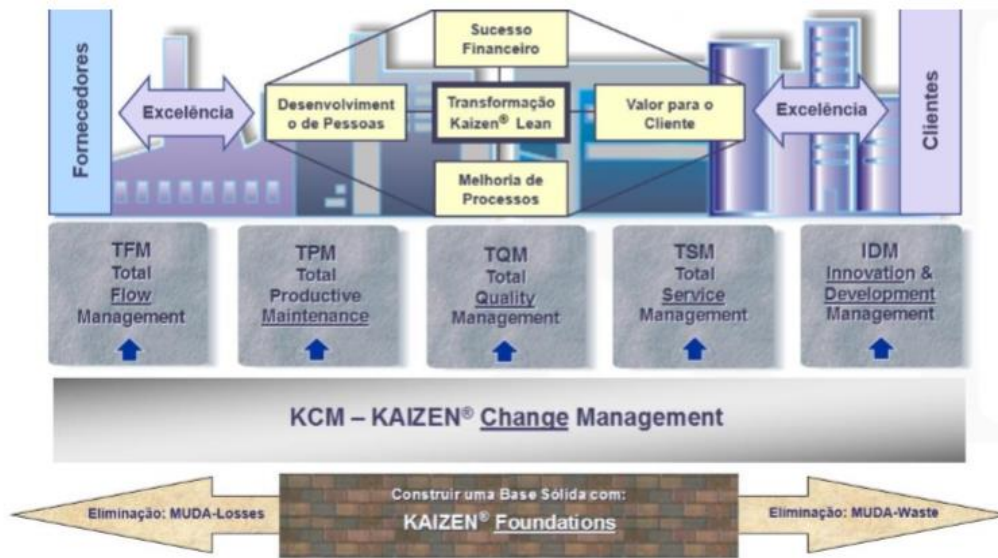


Figura 3 Kaizen Management System [30]

2.1.3 Princípios

Para a implementação do *Kaizen* numa organização é necessário em primeira estância definir valor, ou seja, especificar o valor na perspectiva do cliente e seguidamente visualizar a cadeia de valor, por forma a identificar desperdícios existentes em todas as etapas da cadeia. Seguidamente, é necessário melhorar o fluxo e implementar ações para eliminar o *Muda* – aumentando assim o valor acrescentado - e melhorar o fluxo, implementando um sistema *pull*, ou seja, fazer só o que é puxado pelo cliente *Just-In-Time* (JIT) e por último, aspirar continuamente para perfeição, através da eliminação contínua do *Muda*.

Para ser possível a implementação de uma forma eficiente da metodologia *Kaizen*, é necessário respeitar e potenciar os seus fundamentos [30]:

- I. Criar valor para o cliente – identificar os interesses dos clientes, as suas necessidades e melhorar a sua experiência;
- II. Eficiência do fluxo – esforço pela eliminação do *Muda*.

- III. Eficácia do *Gemba* – o *Gemba* é o local onde se acrescentar valor, identificando problemas que não são nada mais do que oportunidade de melhoria e aumentando assim a densidade de valor acrescentado criado. Segundo o *Kaizen Institute*, deve-se [30]:
- a. Deslocar ao *Gemba*;
 - b. Verificar *Gembutsu*, que engloba máquinas, material, avarias, não conformidades, etc;
 - c. Procurar de eventuais problemas: *Muda*, *Mura* e *Muri*;
 - d. Criar dados palpáveis e fidedignos;
 - e. Aplicar *Kaizen* por forma a eliminar as causas principais dos problemas detetados;
 - f. Normalizar as operações, por forma a impedir as ocorrências definitivamente.
- IV. Envolvimento dos colaboradores – preocupação em dar objetivos claros a todos os níveis, bem como formar os colaboradores através de *Gemba Kaizen workshops* e do desenvolvimento de *team leaders* e equipas naturais (englobam todos os colaboradores com a mesma função e responsabilidade). Tem também como missão manter um índice elevado de motivação através da introdução da melhoria de processos, assim como do ambiente de trabalho;
- V. Gestão visual – uma ferramenta bastante poderosa que serve para identificar claramente o valor acrescentado e o valor não acrescentado, melhorar a validação de processos e colaboração. Esta ferramenta serve para ajudar a responder a uma série de questões como qual a função da equipa, quais as atividades que são desenvolvidas nesta área, como é que os colaboradores sabem o que têm de fazer, quais os objetivos da equipa, o respetivo grau de cumprimento e detetar anomalias. A gestão visual pode dar sinais positivos, dando o *feedback* que os objetivos estão a ser cumpridos, motivando os colaboradores, fazendo com que se

sintam mais orgulhosos e confiantes; pode também transmitir dados negativos que dão o sinal que tem de haver uma mudança, criando constrangimento. A escolha da metodologia *Kaizen* basear-se em transmitir a informação relevante de uma forma visual deve-se a que os seres humanos recolhem 83% da informação através da visão.

2.1.4 Valor acrescentado e 3MU'S

Segundo o *Kaizen Institute* o valor acrescentado diz respeito a todas as operações que o cliente aceita pagar. Desta forma, valor não acrescentado diz respeito às operações que não acrescentam valor ao produto final, englobando assim operações de transporte, armazenamento, tempos de *setup*, tempos de espera, limpeza, inspeção, não conformidades, entre outros [30].

Em 2006, o *Lean Enterprise Research Center* [2] realizou um estudo no qual conclui que:

- I. Apenas 5% do total das atividades desenvolvidas nas organizações acrescentam valor ao produto;
- II. 35% das atividades, apesar de serem necessárias, não acrescentam valor ao produto;
- III. 60% das atividades desenvolvidas não acrescentam valor ao produto nem sequer são consideradas necessárias.

Assim sendo, as organizações deveriam desenvolver e possuir processos, tecnologias e colaboradores adequados à quantidade efetivamente requerida pelos clientes, de forma a que o produto ou serviço solicitado fosse entregue no tempo estipulado ao cliente. Quando tal não acontece, verifica-se um balanceamento inadequado entre aquilo que é a capacidade e a carga, resultando em perdas e desperdícios para a empresa [44].

Segundo a filosofia *Lean Management* existem três atividades definidas por palavras japonesas que não acrescentam valor ao processo, também designadas por 3MU's [42] (Figura 4):

- I. *Muda* – engloba todas as atividades que não acrescentam valor ao produto, traduzindo-se em desperdícios, devendo ser eliminados [42]. Segundo Imai, efetuar uma correta identificação dos *mudas* é o passo inicial e fulcral para desenvolver ações para os eliminar do processo [24];
- II. *Mura* – diz respeito às irregularidades, flutuações e variabilidade que acontecem no espaço produtivo, acontecendo por exemplo quando uma linha de produção contínua é interrompida pelo tempo de operação do colaborador ser superior ao estimado ou por executar de uma forma diferente um trabalho repetitivo [28];
- III. *Muri* – engloba o princípio de sobrecarga, seja ela das instalações, como de equipamento e operadores. Está-se perante um cenário de Muri, quando a um equipamento ou colaborador está a ser requerido performance superiores às suas capacidades atuais, provocando assim problemas quer de qualidade, quer de segurança e avarias dos equipamentos [55].

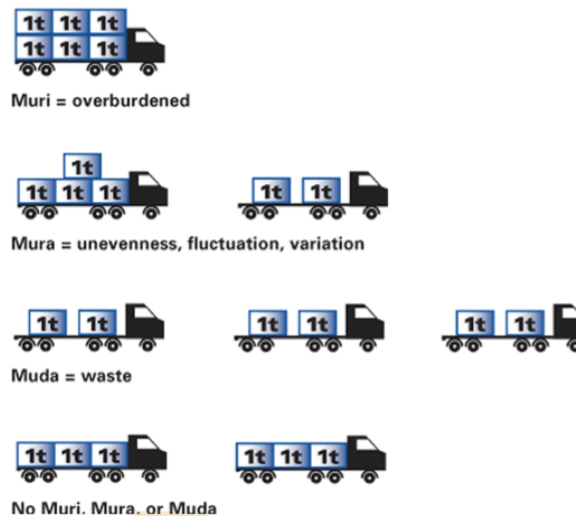


Figura 4 3M [34]

2.1.5.7 *Muda*

Entre 1988 e 1989, Ohno e Shingo [49] identificaram os 7 principais tipos de desperdícios, também chamado modelo dos 7 *Muda*, que podem existir num sistema produtivo, sendo de realçar que esta classificação é um dos passos primordiais da filosofia *Lean Management* (Figura 5):

- I. Sobreprodução – trata-se do desperdício de produção excessiva face ao que é encomendado pelo cliente, sendo que origina outros desperdícios como quantidades de stock elevadas, grande volume de *Work In Progress* (WIP) e o consumo em excesso de recursos humanos, matérias-primas e equipamentos [51];
- II. Espera – refere-se aos tempos em que um colaborador ou uma máquina ficam parados, não acrescentando valor ao produto e contribuindo assim para a diminuição da eficiência do sistema produtivo. De referir que as esperas podem ser originadas por avarias de máquinas e equipamentos, *bottlenecks*, problemas de qualidade, elevados tempos de *setup*, falta de matéria prima e/ou componentes, planeamento de produção deficitário, entre outros [51];
- III. Transporte – o desperdício com transportes é relativo ao fluxo de materiais no sistema produtivo, começando no fornecedor e finalizando no cliente final. Um *layout* inadequado leva a que quer as matérias primas como produtos semiacabados e acabados necessitem de percorrer distâncias consideráveis para que cheguem ao local de processamento ou de armazenamento [51];
- IV. Inventário – o desperdício de *stocks* foca-se na acumulação excessiva de matérias primas, componentes e produtos acabados no sistema produtivo, sendo importante referir que este fator pode, por vezes, esconder problemas de qualidade dos produtos, falta de capacidade produtiva e, conseqüentemente, incumprimentos dos prazos de entrega. De referir que este espaço ocupado pelos *stocks* não pode ser menosprezado, tendo os mesmos custos de posse associados, assim como níveis de stocks elevados podem originar o armazenamento de produtos que, entretanto, ficaram obsoletos ou perderam a validade;
- V. Excesso de processamento – refere-se a processos e operações que não são efetuados de uma forma eficaz e eficiente, levando a que haja necessidade de reprocessamento ou então a que os mesmos não sejam sequer necessários. A ausência de normalização de processos de produção (ou a sua existência de uma forma errada ou desatualizada), uso de maquinaria inadequada e a falta de competência e formação de operadores são as principais causas de existência deste desperdício;

- VI. Movimentação – o desperdício da movimentação foca-se nos movimentos que são efetuados pelos colaboradores, sendo exemplo disso a procura por ferramentas, documentos e materiais, assim como a necessidade de tirar dúvidas ou ter de realizar o abastecimento do seu local de trabalho. Tal acontece em grande parte devido a *layouts* e postos de trabalho inadequados, assim como a falta de organização, de metodologia de trabalho e ergonomia deficitária;
- VII. Defeitos – relacionado com problemas de não conformidade nos produtos, sendo que neste caso existem duas soluções: a reparação do produto ou a sua rejeição. De forma a evitar o surgimento de defeitos, as organizações aumentam o número de pontos de inspeção ao longo da sua cadeia, assim como os níveis de *stock*, por forma a ser possível compensar produtos que possuam problemas de qualidade, no entanto, é importante ressaltar que a implementação destas metodologias inflaciona consideravelmente os custos de produto final, o que pode causar problemas económico-financeiros para a organização caso não sejam tidos em conta.

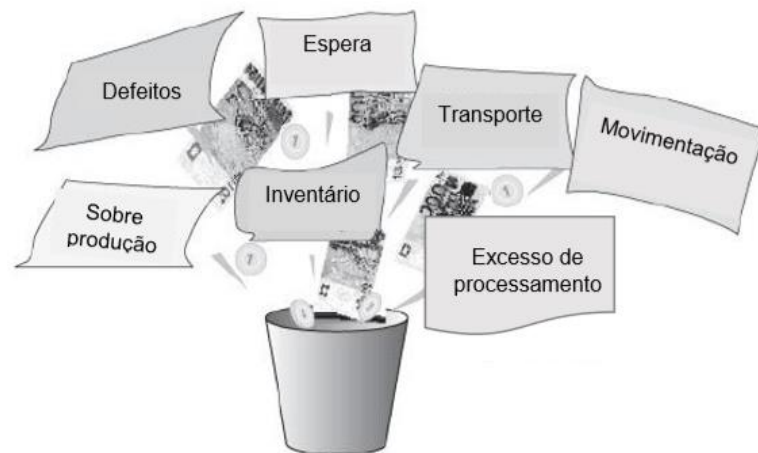


Figura 5 Muda [12]

Para além dos sete desperdícios na produção referidos acima, Brunt e Butterworth em 1998 definiu outros desperdícios [8]:

- I. Incorreta ou inexistente utilização do potencial humano;
- II. Desperdícios energéticos;

- III. Desperdícios de materiais;
- IV. Utilização de sistemas inapropriados;
- V. Desperdícios quer nos serviços quer nos escritórios;
- VI. Desperdício do tempo do cliente.

Já Womack e Jones, em 2003, propôs a representação de bens ou serviços que não se encontram conformes perante os requisitos do cliente como sendo o oitavo desperdício [84]. Já Liker em 2004 [38], propôs como oitavo desperdício a criatividade não usada e, em 2006, Ortiz [51] propõem que o oitavo desperdício refira-se a potencial humano que não é utilizado.

O modelo dos 7 Muda também pode também ser aplicado na manutenção:

- I. Manutenção excessiva – refere-se a manutenções corretivas de uma forma repetitiva, assim como a reparação de algo não tendo o conhecimento do que é que efetivamente está avariado;
- II. Transporte de materiais e equipamentos – trata-se da movimentação de ferramentaria que não são necessários para a realização das tarefas de manutenção, assim como a localização deficitária de ferramentas distantes do ponto de manutenção, levando a percorrer grandes distâncias não necessárias;
- III. Materiais e equipamentos parados – associa-se à existência de componentes em excesso ou em déficit, assim como a posse de ferramentas de elevado custo com tempos de utilização reduzidos, ferramentas cuja operação só pode ser efetuado por um número reduzido de colaboradores e, obviamente, possuir equipamentos parados à espera de uma dada intervenção de manutenção;
- IV. Movimento de pessoas – refere-se aos colaboradores deslocaram-se à procura das ferramentas e peças, assim como a procura de ordens de reparação e instruções de reparação nos computadores;

- V. Colaboradores parados – espera dos colaboradores por ordens e/ou instruções de trabalho do chefe de equipa, assim como a necessidade do colaborador esperar que a máquina pare para efetuar a intervenção e/ou reparação e espera pela entrega de ferramentas e equipamentos;
- VI. Sobreprocessamento – está associada à aplicação de soluções caras para a resolução de problemas simples, desenvolvimento de sistemas complexos em vez de recorrer a sistema automáticos de baixo custo;
- VII. Defeitos e erros – engloba uma inadequada correção de avarias, a não realização de testes que garantam que a avaria foi suprimida e a aquisição de componentes e ferramentas que não sejam os necessários para um intervenção.

2.1.6. Ferramentas *Kaizen*

Para fazer face aos 7 *mudas* referidos anteriormente, a metodologia *Kaizen* incorpora um conjunto de técnicas e ferramentas que possibilitam alcançar os melhores resultados possíveis, de acordo com o *Muda* a que está a ser alvo de análise. Estas ferramentas irão ser analisadas ao longo desta dissertação (Figura 6).

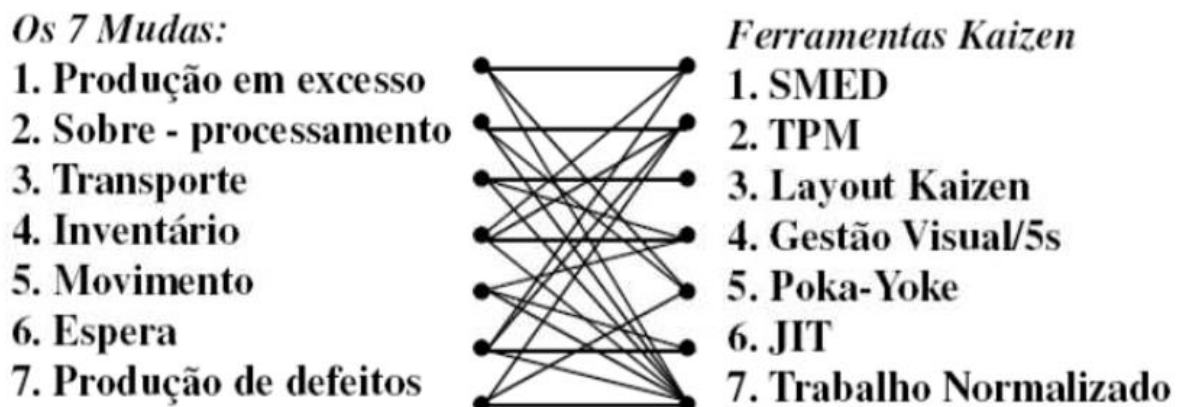


Figura 6 Relação entre os 7 *mudas* e as ferramentas *Kaizen* [29]

2.1.6.1 5S

Os 5S foram criados do Japão na década de 60 baseado em cinco sentidos, permitindo melhorar processos produtivos e recursos humanos, assim como a organização do posto de trabalho, reduzindo os desperdícios e aumentando a eficiência produtiva [53]. Em

1999, Vanti, classificou a metodologia 5S como uma metodologia focada na organização, visando a adoção de melhores práticas das organizações e dos colaboradores, através da utilização de ferramentas como o JIT, o *Kaizen*, o TPM e o TQM [76]. Chalice, em 2007, defendeu que o 5S tem como objetivo promover a organização dos postos de trabalho, aumento da produtividade e condições de trabalho [11].

Os cinco sentidos são [71]:

- I. *Seiri* (organização) – identificar o que é necessário e eliminar o desnecessário;
- II. *Seiton* (arrumação) – tudo o que é necessário deve ser arrumado e ordenado, sendo possível de encontrar por qualquer colaborador;
- III. *Seiso* (limpeza) – limpar de uma forma sistemática e eficiente;
- IV. *Seiketsu* (Padronização) – garantir o estado de arrumação, limpeza e ordem;
- V. *Shitsuke* (disciplina) – disciplinar a obedecer o que foi determinado.

A implementação desta ferramenta tem como principais vantagens de incorporação maior segurança para os colaboradores, aumento da produtividade, aumento da flexibilidade, melhoria dos índices de qualidade, redução de *stocks* e espaço utilizado e eliminação de atividades que não acrescentem valor ao produto.

2.1.6.2 Normalização e 5W2H

Uma norma representa a maneira conhecida, até ao momento, mais fácil simples e segura de fazer um trabalho, garantindo [30]:

- I. Bases de treino e formação para os colaboradores;
- II. Preservação do conhecimento;
- III. Manutenção da estabilidade quer de processos quer de procedimentos;
- IV. Prevenção de erros que anteriormente eram sistemáticos;
- V. Linhas de orientação que possibilitam a atribuição de tarefas e responsabilidades;

- VI. Bases e referências para situações de avaliação de diagnóstico e auditorias;
- VII. Evidenciar uma relação causa-efeito, uma vez que sempre que é detetada uma determinada anomalia é fácil identificar qual a instrução de tarefa é que não foi executada referente à norma estabelecida.

Para o desenvolvimento de normas é necessário, inicialmente, identificar todos os processos desenvolvidos na área em estudo, definindo seguidamente prioridades para desenvolvimento das normas; posteriormente é necessário estabelecer quem irá fazer parte do desenvolvimento de cada norma e observar a situação atual, no próprio *Gemba*; seguidamente é necessário desenvolver a norma de uma forma visual e testar no *Gemba*, de forma à sua validação ou não; caso seja validada é necessário formar os colaboradores para agirem consoante a norma criada e garantir que a mesma é acompanhada e melhorada ao longo do tempo.

Para que uma norma seja amplamente utilizada de uma forma eficiente é necessário que esta seja objetiva, simples, única, acessível, segura e visual. Dentro das normas que são aplicadas pelo *Kaizen* são de destacar as normas de controlo de qualidade, normas de controlo de processo, normas de trabalho e normas de manutenção.

Segundo o Instituto *Kaizen*, a técnica 5W2H é uma ferramenta de grande importância para as organizações, uma vez que dá um grande apoio na elaboração de normas, eliminando assim qualquer dúvida de um determinado processo, tornando o mesmo simples e claro [57] [30]. O 5W2H é uma ferramenta visualmente em forma de quadro, tabela ou lista, que descreve as atividades que têm de ser desenvolvidas num determinado processo, bem como instruções para execução e controlo.

Esta ferramenta responde a sete questões fulcrais:

- I. *What* – procura melhorar a combinação de trabalho entre homem-máquina com o objetivo de produzir da forma mais eficiente;
- II. *Why* – para reduzir e se possível eliminar os desperdícios e problemas devido à inexistência de normas ou normas poucos claras;

- III. *Where* – qualquer processo numa organização;
- IV. *Who* – engloba qualquer colaborador da organização;
- V. *When* – sempre que possível as normas devem ser criadas, alvo de auditoria e monitorizadas de forma sistemática;
- VI. *How* – através da criação e desenvolvimento de equipas multidisciplinares que tenham foco na melhoria das normas ou criação de novas, caso seja necessário;
- VII. *How much* – quanto custará à organização a sua implementação e qual será o retorno económico-financeiro.

2.1.6.3 Ferramenta 3C

Para a resolução de estruturada de problemas de média/alta complexidade o *Kaizen Institute* desenvolveu a ferramenta 3C, sendo que se está perante um problema quando se verifica um desvio entre a situação atual e a situação esperada ou um padrão [37]. De destacar que uma ferramenta estrutura de problemas deve ser capaz de identificar, analisar e eliminar o problema detetado, assim como prevenir casos de reincidência do mesmo [37].

A ferramenta 3C é composta por 3 fases distintas [30]:

- I. Caso – nesta fase deve haver foco na identificação de problema e não de possíveis soluções. Após identificado e selecionado o problema, deve-se realizar a definição do objetivo a atingir, preferencialmente que seja mensurável.
- II. Causa – nesta fase pretende ser determinada a causa raiz do problema, devendo ir até ao *Gemba* na procura por sintomas de *Muda* e de variabilidade do processo sendo que para tal, comumente são utilizadas ferramentas de análise como os 5 *Why's* e o Diagrama de Espinha de Peixe.

A ferramenta dos 5 *Why's* trata-se de uma ferramenta iterativa que não necessita de muitos recursos nem de análise estatística [70]. A primeira pergunta deve ser o porquê da ocorrência do problema e assim que se obtiver a resposta, realizar

novamente a pergunta, continuando o ciclo, geralmente até às cinco perguntas, sendo que não há qualquer imposição ao número de perguntas que devem ser feitas. É importante reter que a aplicação da ferramenta não deve ser interrompida logo após a identificação de problema, uma vez que pode não ser ainda a verdadeira causa do problema, sendo importante realizar o desdobramento.

O diagrama de Causa-Efeito (ou Diagrama de Espinha de Peixe) foi desenvolvido por Kaoru Ishikawa no Japão na década de 50, sendo a sua aparência muito semelhante à espinha de um peixe. Segundo Kaoru Ishikawa, em 1993, o efeito – isto é, o problema – pode ter como origem o método, a matéria prima, a mão de obra, as máquinas, a medição e o meio ambiente. Independentemente da ferramenta de análise de causa raiz utilizada, após a identificação da causa raiz, a organização deve trabalhar para que seja efetuada a normalização dos procedimentos que foram utilizados para a resolução do problema [19].

- III. Contramedida – após a deteção a causa raiz, deve ser elaborado um plano de ações para as melhorias definidas, com prazo estipulados.

No fim, pode e deve ser efetuada uma quarta fase relativa à confirmação, onde devem ser realizadas reuniões de acompanhamento para verificação dos indicadores de desempenho, por forma a avaliar o impacto das contramedidas implementadas.

2.1.6.4 *Value Stream Mapping e Value Stream Design*

O VSM é uma ferramenta de mapeamento do fluxo de valor criada por Rother e Shook em 1999 [59], servindo como ferramenta utilizada pela metodologia *Kaizen* para efetuar o diagnóstico do mesmo, através da representação em forma de diagrama de todas as atividades desenvolvidas num determinado fluxo de material e/ou de informação necessárias para a produção de determinado produto ou serviço, ao longo de toda a cadeia de valor. A aplicação desta ferramenta permite a visualização de uma perspetiva global de toda a cadeia de valor do produto, permitindo assim identificar quais as atividades que acrescentam valor ao produto e que não acrescentam, bem como *mudas* associados, permitindo assim desenvolver ações de melhoria [59]. A repetição do uso

desta ferramenta de forma cíclica, permite que as organizações estejam em melhoria contínua da cadeia de valor, diminuindo assim o *lead time* ao cliente e a redução dos *mudas* associados ao processo produtivo.

A implementação do VSM é decomposta em quatro fases distintas [59]:

- I. Seleção e caracterização da família de produtos a serem analisados;
- II. Elaboração do VSM atual recorrendo a informações recolhidas quer em *back office* quer no chão de fábrica relativas a todas as etapas do processo produtivo. Ainda podem ser adicionadas ao VSM informações como o tempo de ciclo, *lead time*, tempo de troca de ferramentas, disponibilidade de máquinas ou da linha produtiva, número de colaboradores por turno e/ou secção, tamanhos de lotes produzidos, entre outros.
- III. Construção do *Value Stream Design* (VSD), tendo como base as ações propostas de melhoria que foram identificadas após ser analisado o VSM atual e terem sido detetadas as atividades que não acrescentam valor ao produto ou que têm *mudas* associados;
- IV. Elaboração do planeamento e implementação das ações de melhoria propostos que irão servir para atingir o estado futuro desejado.

Durante a execução do VSM e VSD é recorrente a utilização de diagramas de *Spaghetti* que apresentam o percurso de um produto ou colaborador no *layout* físico de uma organização.

2.1.6.5 Kanban

O *Kanban* é uma ferramenta de gestão visual que teve origem nos sistemas produtivos *pull flow*, servindo como ferramenta de coordenação da linha produtiva, assim como de todas as atividades de transporte de materiais e de informação entre os diversos postos de trabalho e tendo como principio que um posto de trabalho só realiza uma dada atividade de produção, caso o posto de trabalho posterior assim o autorize – a autorização pode ser dada através de cartão, caixas, espaços vazios, entre outros [45]. A

utilização desta ferramenta tem como intuito a minimização dos níveis de *stock*, sendo que para isso é utilizado para sistemas produtivos de lotes de dimensões reduzidas e que os mesmo são armazenados em recipientes *standard* e com um número estipulado de peças. Para cada lote, terá de haver sempre um *Kanban* associado, podendo ser apresentado de diversas formas.

Para além da diminuição dos níveis de *stock*, esta ferramenta permite a deteção de falhas no sistema produtivo, redução de tempos de espera e tempos de paragem e garante a interligação entre os diversos postos de trabalho, tendo assim um papel crucial na criação e manutenção de um fluxo contínuo com um índice de desperdício associado reduzido [45].

De referir que o sistema *Kanban* apresenta duas tipologias distintas, mas interligadas [58]:

- I. *Kanban* de produção – autorizam a produção de uma dada quantidade de um determinado produto, bem como apresentam informações necessárias para a sua execução;
- II. *Kanban* de transporte – autorizam a movimentação de um determinado material entre dois pontos.

2.1.6.6 *Mizusumashi*

Quando não é possível eliminar uma atividade de transporte de logística interna, é proposta a junção de todos os *mudas* de transporte e assumir como função de aprovisionamento, denominado *Mizusumashi*. Este colaborador tem como responsabilidade o abastecimento dos materiais, matérias primas e informação necessários para a produção nos diferentes postos de trabalho, seguindo rotas predefinidas, transportando quantidades pequenas de materiais em horários predefinidos. O objetivo do recurso a este colaborador prende-se com o facto de diminuir em grande parte os *mudas* dos trabalhadores de produção, que anteriormente à utilização deste recurso, utilizavam o seu tempo útil de trabalho em atividades de que não representam valor acrescentado ao produto, como o transporte de material entre os

supermercados e os bordos de linha, bem como o manuseamento dos cartões *Kanban* [30]. No abastecimento do bordo de linha o *Mizusumashi* inicialmente recolhe as caixas vazias do bordo de linha, em seguida repõe nas caixas a quantidade indicada pelo *Kanban*, regressando novamente ao bordo de linha com as caixas cheias e realiza o abastecimento, repetindo este ciclo de uma forma cíclica.

O *Mizusumashi* pode executar as suas funções de duas formas distintas [30]:

- I. Executar a próxima atividade de acordo com a lista de prioridade. Apesar de parecer uma abordagem simplista, é de elevada complexidade uma vez que pode causar entropia ao *Mizusumashi* saber qual a atividade mais importante, assinalando também como desvantagem o facto de se verificar uma quantidade elevada de movimentos sem carga, a que corresponde um *Muda*.
- II. Executar um ciclo fixo de atividades no qual o *Mizusumashi* desloca-se ao longo do circuito predefinido, passando em vários pontos de controlo e verificando se em cada posto há alguma tarefa para realizar e caso haja, executa-a. Deve-se ter em atenção que deve haver uma preocupação de sincronização entre o tempo de ciclo de produção e o tempo de ciclo do *Mizusumashi*.

2.1.6.7 Plan-Do-Check-Act e Standardize – Do – Check – Act

O ciclo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) foi desenvolvido por Walter Shewhart na década de 30 e foi divulgado e aplicado por Deming na década de 50, sendo uma das ferramentas mais utilizadas pela metodologia *Kaizen* na gestão de tomada de decisões associada a ações de melhoria e resolução de problemas, sendo composta por 4 etapas [79]:

- I. *Plan* – nesta etapa realiza-se o planeamento da ação de mudança e/ou melhoria com o intuito de melhorar um processo, estabelecendo metas;
- II. *Do* – realização da mudança ou teste anteriormente planeado e recolha de dados para posterior análise;
- III. *Check* – observação e análise dos resultados obtidos pelo teste de uma forma periódica, comparando com o planeamentos e objetivos anteriormente traçados;

- IV. *Act* – implementação das ações de melhoria de acordo com o teste que foi realizado.

O objetivo da utilização desta ferramenta é obter soluções para melhorias de processos e resolução de problemas, criando-as e realizando testes e melhorando as soluções inicialmente propostas, garantindo assim que só sejam implementadas melhorias que tenham sido devidamente testadas [79].

No entanto, na metodologia *Kaizen*, após ser realizado o ciclo completo de PDCA é necessário padronizar as melhorias obtidas, através da estabilização do processo de teste, usando para isso o ciclo *Standardize – Do – Check – Act* (SDCA) [30]. O ciclo SDCA é composto por 4 fases:

- I. *Standardize* – redigir o procedimento de trabalho efetuado, documentando as instruções de trabalho e respondendo a questões de o quê, como e porquê;
- II. *Do* – formar e treinar os colaboradores para a aplicação das novas normas e colocá-las de uma forma visível e de fácil leitura e interpretação;
- III. *Check* - realizar auditorias por forma a garantir que as normas são aplicadas, sendo que o responsável da mesma deve ser externo ao processo no qual a norma foi instaurada, e registar anomalias que tenha verificado;
- IV. *Act* – promover ações de melhoria e correção das normas, através de formação e sugestões, garantindo que os colaboradores se sintam envolvidos na prática da melhoria contínua.

2.1.6.8 OEE

O OEE refere-se a uma métrica de eficiência produtiva, sendo estratificada em índices de disponibilidade, qualidade e performance [20]. A utilização e análise do OEE permite realizar cenários de comparação do desempenho real de uma dada célula de fabrico ou linha produtiva comparativamente à capacidade ideal durante o período de tempo em que se planeou que produzisse, sendo que um OEE igual ou superior a 85% é considerado como referência [73].

O índice de disponibilidade releva qual a percentagem do tempo planeado é que efetivamente a célula de fabrico este a produzir. Já o índice de performance compara a velocidade de produção planeada com a real – entenda-se por cadência produtiva. O índice de qualidade representa a percentagem de peças produzidas que correspondem às especificações do cliente. O OEE é calculado através da multiplicação destes três índices [73].

A utilização desta ferramenta com vista a alcançar a máxima eficiência dos equipamentos é possível através da eliminação das grandes perdas [73]:

- I. Falha do equipamento devido a indisponibilidade do mesmo;
- II. Tempos de *setups*;
- III. Ocorrência de pequenas paragens;
- IV. Redução da cadência produtiva comparativamente a dados anteriores;
- V. Defeitos de qualidade e necessidades de *reworks*;
- VI. Perdas de arranque das máquinas.

A utilização desta métrica e constante luta para aumentar o seu índice, mesmo que seja um valor numericamente reduzido, torna-se uma grande vantagem competitiva, uma vez que são diminuídos os custos de produção, oferecendo assim uma maior flexibilidade na estipulação do preço do produto [85].

2.1.6.9 *Single Minute Exchange of Die*

A *Single Minute Exchange of Die* (SMED) refere-se a uma ferramenta da metodologia *Lean* para troca rápida de ferramentas, sendo aplicada na indústria para a redução dos tempos de processos de *setup*. Para isso promove a otimização do processo através da reconfiguração de dispositivos, bem como de sistemas de fixação de materiais, maximizando a eficiência dos meio utilizados assim como o aumento da flexibilidade dos processos. A redução dos tempos de *setup* é de carácter importantíssimo para as

organizações, uma vez que não correspondem a operações de valor acrescentado, pelo que quando não é possível eliminar os mesmos, deve-se procurar reduzir ao máximo.

Esta ferramenta foi inicialmente desenvolvida por Taiichi Ohno e posteriormente consolidada por Shigeo Shingo em 1985 [66], sendo que o mesmo defendeu a existência de duas categorias de operações de *setup*: internas e externa; as operações que fazem parte do *setup* interno correspondem às operações que só podem ser efetuadas com a máquina parada, enquanto as operações que fazem parte do *setup* externo permitem que a mesma esteja em funcionamento.

Segundo Shingo em 1985, este método deve ser implementado faseadamente [66]:

- I. Etapa 0 – nesta etapa as operações internas e externas não estão categorizadas, sendo o processo de *changover* desorganizado e não planeado, devendo-se observar a situação atual através de filmes e cronometragem;
- II. Etapa 1 – o objetivo desta etapa consiste na clara separação de operações de *setup* interno e externo;
- III. Etapa 2 – reduzir a transição o máximo possível, através da conversão de atividades internas em externas;
- IV. Etapa 3 – racionalizar e simplificar, através de alterações e reconfigurações do equipamento e da melhoria de operações manuais através de ações de formação e treino, bem como de sugestões dos colaboradores.
- V. Etapa 4 – criação de procedimentos e normas

2.1.6.10 *Jidoka e Poka Yoke*

O *Jidoka* é uma metodologia de autonomação, isto é, associar a automação dando um toque humano, sendo que se refere a dispositivos instalados em máquinas que impedem que o operador execute um processo de uma forma incorreta, evitando assim a produção de produtos com defeitos [50].

O *Poka Yoke* é uma palavra japonesa que representa “algo que evita erros” ou “sistema à prova de erro”, sendo que esta ferramenta é utilizada para melhoria de produtos, processos e serviços [54]. Para Thomaz, em 2015, a implementação do *Poka Yoke* numa organização permite e promove a criação de procedimentos, ferramentas e equipamentos, que auxiliem a prevenção de erros que provoquem defeitos [75]. Esta ferramenta em primeira instância identifica o problema, posteriormente estuda os métodos de prevenção de existência do problema ou deteta antes ou depois que ocorram (de preferência de forma proativa) e finalmente identifica e aciona as medidas a tomar. Assim sendo, esta ferramenta pode servir como um método de prevenção ou um método de deteção.

2.2 LEAN MANUFACTURING

O *Lean Management* trata-se de uma filosofia de gestão que tem como objetivo a melhoria da qualidade e rapidez dos processos, focando para isso na redução e se possível eliminação dos desperdícios e no estudo da melhor maneira de executar um dado processo-tarefa, sendo que pode ser associada aos processos internos da organização, assim como aos fornecedores e clientes [65] [82]. Este conceito surgiu na década de 40, no Japão na Toyota, onde foi criado e desenvolvido o *Toyota Productive System* (TPS), que caracteriza-se por ter como objetivo a produção em fluxo contínuo, com a ressalva que para ser possível atingir uma eficiência produtiva satisfatória não são necessários longos ciclos produtivos, uma vez que só uma parte residual do tempo de total de trabalho é que cria realmente valor ao produto. Esta filosofia surgiu numa altura em que Henry Ford desenvolveu e implementou sistemas de produção em massa, ao contrário da metodologia *Lean* que tem como base adaptar a sua produção consoante as necessidades atuais do mercado [41]. O *Lean Management* foca-se assim em atingir a perfeição, focando-se na redução dos custos de uma forma contínua, sendo que simultaneamente agiliza mudanças para ser possível atingir zero defeitos e, a grande diferença para aos sistemas de produção em massa, ser possível produzir um vasto leque de produtos [83].

Inicialmente a metodologia *Lean* tinha como foco o *Lean Production*, no entanto expandiu essa metodologia para o *Lean Thinking*, sendo assim possível implementar as ações ao longo de toda a cadeia de valor, começando, primeiramente, por definir o conceito de valor para o cliente e seguidamente otimizar os processos que adicionam valor ao produto.

A implementação desta metodologia tem como principais vantagens a diminuição dos *lead times* [35], redução dos níveis de *stock*, redução dos desperdícios, aumento do nível de conhecimento dos processos da organização e obtenção de mais valias financeiras através da redução dos defeitos [41].

A implementação da metodologia *Lean*, tem oito áreas principais de foco (8P's-I-VIII) [22]:

- I. Propósito - antes da implementação propriamente dita desta metodologia numa organização é necessário definir a missão e os objetivos da mesma;
- II. Processo – tem como foco a reestruturação e otimização dos processos e se os mesmos criam ou não valor para o cliente e se são ou não necessários;
- III. Pessoas – todos os colaboradores têm um papel ativo e são agentes de mudança, sendo que os gestores necessitam ser formados para que representem uma inspiração para os colaboradores e que consigam demonstrar e promover a adoção de comportamentos corretos;
- IV. Puxar (*Pull*) – atingir o *Pull-Based Delivery*, isto é, a produção baseada nos pedidos do cliente, assim como o *Pull-Based Improvement* que implementa ações de melhoria do processo pelos colaboradores e o *Pull-Based Training* que é o desenvolvimento de ações de formação de acordo com as necessidades principais dos colaboradores;
- V. Prevenção – para cada processo usar mais que uma ferramenta de melhoria, para que as possíveis falhas de cada uma, possam ser detetadas por outras ferramentas;

- VI. Parceria – dada a importância de toda a cadeia de abastecimento, é necessário o desenvolvimento e fomentação de boas relações quer com os fornecedores quer com os clientes;
- VII. Planeta – a redução dos desperdícios no sistema produtivo, irão levar a que uma quantidade significativa dos recursos do planeta não seja utilizada, contribuindo assim para melhorar o ambiente global;
- VIII. Perfeição – analisar todos os processos com o objetivo da perfeição, aplicando para isso as melhores metodologias conhecidas.

Melton, em 2005, classificou a implementação do *Lean Thinking* em cinco fases (I-V) [41]:

- I. Obtenção de dados – através da observação dos processos atuais e identificação dos pontos de desperdício, envolvendo os colaboradores que estão diretamente afetos a esse processo, explorando assim o seu conhecimento;
- II. Análise de dados – recorrendo a equipas multidisciplinares, analisar os dados recolhidos, identificando os fenómenos indesejados que ocorrem, mas não deveriam ocorrer;
- III. Desenvolvimento da mudança – tendo em conta os dados analisados, desenvolver processos que visem a eliminação dos desperdícios;
- IV. Implementação da mudança – introdução do processo criado, tendo em conta o treino dos colaboradores, garantindo assim que a equipa que irá implementar esta mudança tenha as condições necessárias para o fazer;
- V. Medir KPI – observação e monitorização de processos e análise dos resultados obtidos com o novo processo e garantir que futuramente esta medição e análise seja continuamente realizada em busca de novas melhorias do processo.

É importante destacar que existem algumas semelhanças entre a metodologia *Kaizen* e a *Lean*, no entanto foram criadas para resolver problemas distintos [63]:

- A metodologia *Lean* reduz/elimina os desperdícios associados a processos;

- A metodologia *Kaizen* introduz e promove a melhoria contínua na cultura de uma organização.

Uma vez que a metodologia *Lean* tem como foco principal a eliminação/redução do desperdício, tal só é possível alcançar através de uma metodologia de melhoria contínua – *Kaizen* –, podendo assim estabelecer uma relação de complementaridade entre as mesmas.

2.3 INDÚSTRIA 4.0

2.3.1 Evolução industrial

A partir do século XVIII, a indústria a um nível global tem vindo a evoluir através de ações de melhoria, de forma a garantir uma capacidade produtiva maior e, simultaneamente, com um menor custo de produção possível, aumentando desta forma a eficiência global da cadeia de valor e caminhando para ir de encontro às expectativas e necessidades dos clientes. Assim sendo, nestes anos, houve sobretudo a necessidade de transformar ateliers (Figura 7) em instalações produtivas evoluídas tecnologicamente (Figura 8).

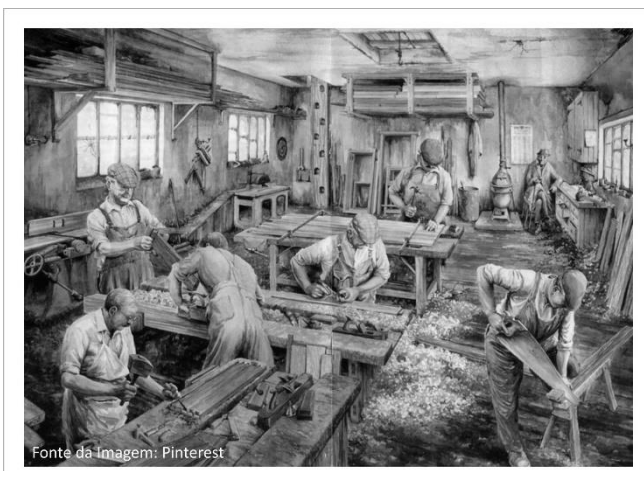


Figura 7 Fabrico de mobiliário no século XVII [64]



Figura 8 Fabrico de mobiliário no século XXI [16]

No século XVIII, ocorreu em Inglaterra a primeira revolução industrial ocorreu, caracterizada essencialmente pela substituição de métodos artesanais por maquinaria, bem como a invenção e implementação dos motores a vapor (Figura 9).

Até ao final da Segunda Guerra Mundial, verificaram-se consecutivamente evoluções nas indústrias químicas, elétricas e de metal. Foi nesta época que foram produzidos os primeiros navios feitos de aço e movidos por motores a vapor, revolucionando o mercado logístico. Durante este período, foram implementadas as primeiras linhas de produção na indústria, surgindo o conceito de produção em massa e o uso da eletricidade, sendo que a este conjunto de inovações denomina-se a segunda revolução industrial [62] (Figura 9).

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, começaram a surgir as inovações e melhorias que são a base da terceira revolução industrial: linhas de produção cada vez mais robotizadas e automatizadas que utilizavam *Programmable Logic Controller* (PLC) [78]; criação e utilização em grande escala do uso de componentes semicondutores, assim como de computadores; meios de comunicação mais flexíveis, nomeadamente a Internet e o telemóvel; meios de armazenamento digital de informação (Figura 9).

Na passagem para o século XXI, verificou-se o desenvolvimento exponencial da Internet e das suas aplicabilidades; bases de dados com grande capacidade de armazenamento e ao mesmo tempo apresentando grande flexibilidade de desenvolvimento e implementação; proliferação do uso de sensores, que passaram a ser cada vez mais fiáveis, robustos e acessíveis; *software* e *hardware* cada vez mais acessíveis a todos os tipos de organizações, sejam orientadas para a produção ou para serviços; os sistemas autónomos terem a capacidade de aprender com o seu funcionamento e partilhando essa informação.

Toda esta transformação foi designada como “segunda idade da máquina” e, em 2011, em Hannover, foi apresentado o conceito de Indústria 4.0 (Figura 9) [5]. No entanto, o processo de desenvolvimento iniciou-se em 2010, quando a Alemanha lançou um plano de desenvolvimento tecnológico *High-Tech Strategy* que tinha como objetivo o fortalecimento de laços e cooperação entre a indústria e a ciência, bem como o aumento da capacidade tecnológica do país.

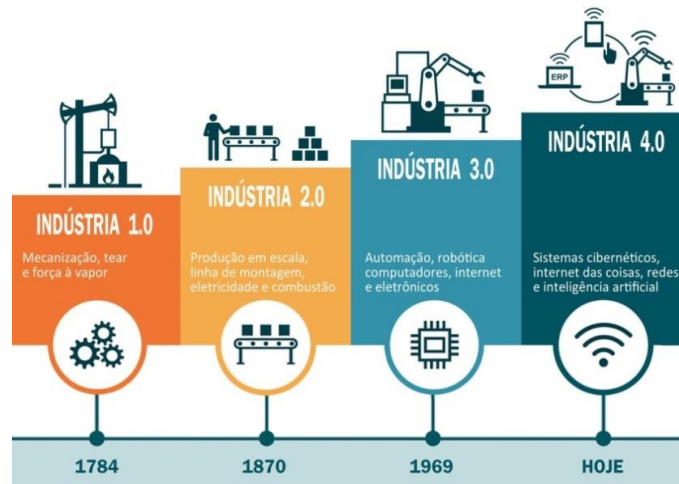


Figura 9 Evolução industrial [32]

A Indústria 4.0 engloba diversas tecnologias e paradigmas tais como sistemas cibernéticos, *Internet of Things* (IOT), computação em nuvem (*cloud*) e inteligência artificial [78].

Este conceito tem como visão a criação e desenvolvimento de fábricas inteligentes, compostas por sistemas modulares, nos quais os sistemas cibernéticos são responsáveis pela monitorização em tempo real dos processos que ocorrem através da virtualização e a descentralização da tomada de decisão, por forma a aumentar a rapidez de resposta do sistema. Estas fábricas inteligentes têm como objetivo produzir ordens individuais de clientes – mudança do paradigma de produção em massa [1]; desenvolver um sistema produtivo com elevado nível de agilidade, por forma a conseguir dar resposta às variações das ordens dos clientes e garantir que todo o sistema possa ser monitorizado de uma forma intuitiva e clara, tornando mais rápidas e assertivas todas as tomadas de decisão [78].

Desta forma, os sistemas cibernéticos recolhem, armazenam e tratam informação, verificando-se comunicação entre sistemas e entre sistemas-operador e através, da computação em *cloud*, toda a informação é disponibilizada a todas os participantes da cadeia de valor (Figura 10).

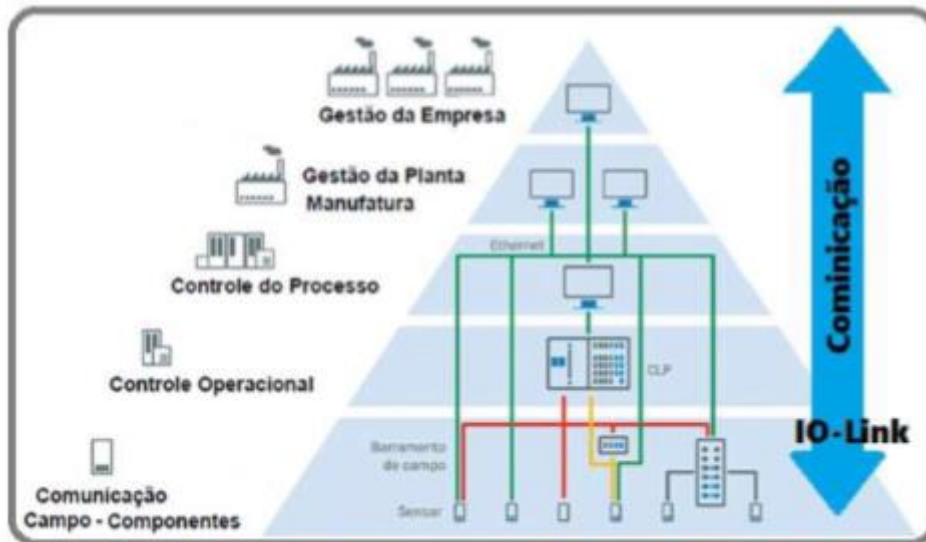


Figura 10 Comunicação Indústria 4.0 [67]

Através da emergência e conciliação tecnológica, surgem cada vez mais oportunidades direcionadas para agregação de valor ao cliente e, simultaneamente, o aumento dos índices de produtividade e eficiência dos vários processos da cadeia de valor [78].

A Indústria 4.0 além de ter como objetivo a otimização das cadeias de valor em todas as fases do ciclo de vida do produto, também contempla a utilização de sistemas quer físicos quer cibernéticos, que trabalhando em conjunto com algoritmos que contêm métodos de análise avançados, permitam que as fábricas inteligentes possuam máquinas autônomas e inteligentes que sejam capazes de prever potenciais problemas de desempenho através da análise de degradação dos seus componentes [1] [36].

A classificação da Indústria 4.0 mediante as suas características pode ser efetuada a partir de três tipos de integração [78]:

1. Integração horizontal a partir de redes de valor – cenário em que se verifica comunicação e cooperação entre diferentes empresas que estão todas encadeadas na mesma cadeia de valor.
2. Integração vertical e sistemas de produção conectados – diz respeito à comunicação entre todos os níveis hierárquicos da mesma fábrica tem como objetivo a criação de sistemas de produção cada vez mais flexíveis, ágeis e reconfiguráveis estando assim progressivamente mais preparados para flutuações das ordens dos clientes.

3. Integração de engenharia ponta-a-ponta através da cadeia de valor – aplicada com o objetivo de tornar mais fácil a adequação à customização, sendo que para isso é necessário a ligação e comunicação entre todas as etapas de criação de um dado produto, englobando assim um vasto leque de departamentos, como comercial, projeto, produção, logística e financeiro.

A figura 11 permite realizar uma comparação entre o estado atual de uma unidade fabril com processos de Indústria 4.0 embebidos e outra que não os usa. A incorporação da indústria 4.0 através da interligação dos fluxos físicos e cibernéticos permite a redução do WIP. O aumento significativo da automação irá reduzir o espaço nas organizações para colaboradores com menos qualificações, no entanto haverá uma maior necessidade de colaboradores mais qualificados para a monitorização e gestão dos diversos departamentos. A incorporação de um maior número de máquinas e de comunicação *machine-to-machine* irá possibilitar uma maior flexibilidade do sistema produtivo e a produção de lotes com menor quantidade será mais rentável, comparativamente ao recurso a mão de obra humana.

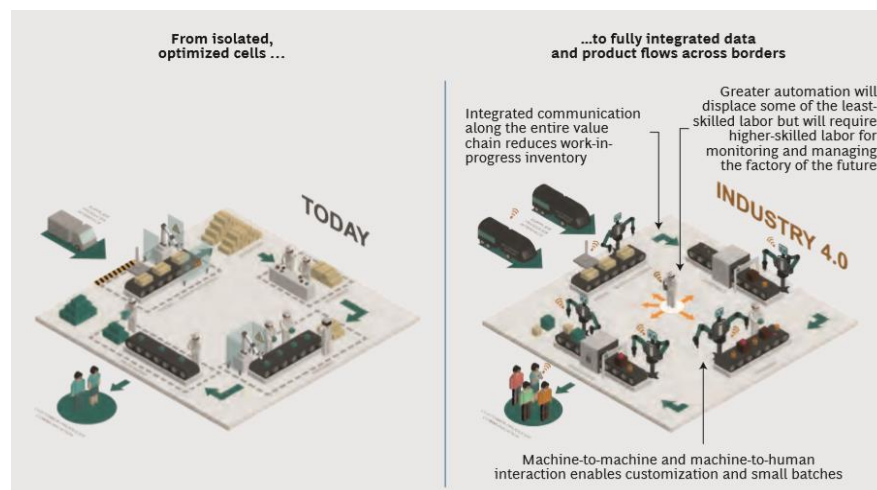


Figura 11 Demonstração de aplicação de Indústria 4.0 e seus impactos [4]

2.3.2 Princípios da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 é caracterizada por seis princípios básicos [54]:

- Interoperabilidade – refere-se à capacidade de interação e de operação entre sistemas, sendo de realçar que os sistemas podem não ser da mesma natureza;

- Virtualização – traduz-se na capacidade de monitorizar os processos (quer sejam físicos ou não) de forma virtual, podendo observar todos os processos da cadeia de valor, sem necessidade de nos deslocarmos ao espaço físico;
- Operação em tempo real – em consonância com o princípio de virtualização, é possível fazer a monitorização da fábrica em tempo real, permitindo realizar alterações no plano de produção, assim como na gestão direta de equipamentos e recursos humanos.
- Descentralização – uma vez que os sistemas são cada vez mais inteligentes (para além de aprenderem com o seu funcionamento, aprendem com o funcionamento de sistemas similares) é possível que um determinado sistema tome as suas próprias decisões. O facto de os sistemas terem a capacidade de tomada de decisão é crucial para a diminuição do tempo de resposta, possibilitando, mais uma vez, caminhar rumo a uma maior eficiência;
- Orientação a serviços – através da IOT encontra-se disponível a comunicação e de interoperação entre todos os participantes do processo, quer interna quer externamente. A orientação a serviços permite que os clientes definam o seu produto através de um *software* próprio, indo de encontro cada vez mais aquilo que são as suas expectativas, levando a que a produção verifique cada vez mais pedidos de customização;
- Sistema modular – torna o sistema bastante flexível, possibilitando boa resposta do mesmo para situações de mudança de especificações do produto ou flutuações sazonais. Este sistema caracteriza-se por as máquinas gerarem automaticamente o *setup* necessário face às especificações das ordens de trabalho.

2.3.3 Pilares da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 tem como pilares para o seu funcionamento que serão descritos de seguida [3] [4].

2.3.3.1 *Industrial Internet of Things*

A Indústria 4.0 é caracterizada pela interoperabilidade entre sistemas cibernéticos, no qual ocorre a comunicação entre máquina-máquina sem a existência da intervenção humana, através do paradigma *Industrial Internet of Things*.

Através da aplicação da IOT qualquer dispositivo e/ou máquina com capacidades informáticas e que possuam conexão à Internet podem comunicar entre si. A adoção da IOT irá permitir às organizações atingir índices de eficiência produtiva de excelência, através da redução dos custos de matérias primas e do tempo de ciclo. (Figura 12 e 13).

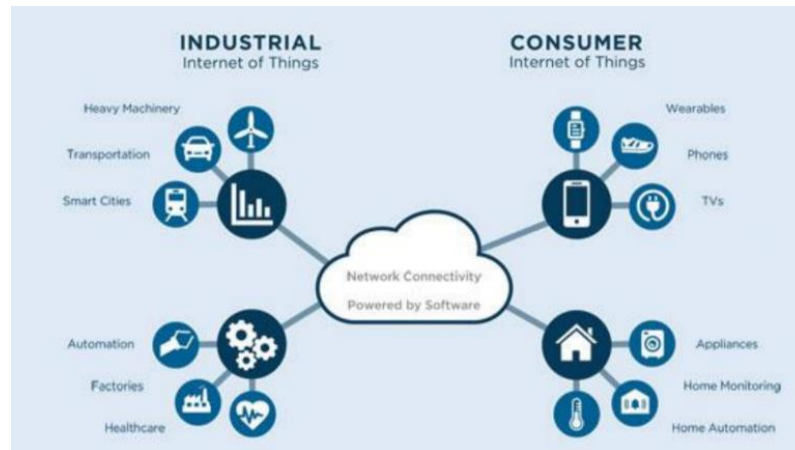


Figura 12 Industrial Internet of Things [31]

2.3.3.2 Cloud

Toda a informação que é enviada e partilhada entre os diversos sistemas e subsistemas traduz-se numa quantidade de informação impossível de ser armazenada fisicamente por uma organização. Assim sendo, surgiu o conceito de *cloud* no qual toda a informação encontra-se armazenada num sistema virtual, caracterizado por índices elevados de segurança e privacidade, garantindo simultaneamente a sincronização automática de dados (Figura 13).

2.3.3.3 Big Data Analytics

As informações que são armazenadas pela *cloud* necessitam de tratamento, de forma a que o processo de tomada de decisão seja mais fácil e assertivo. Estas informações podem ser estudos de mercado de clientes e fornecedores, assim como dados internos da organização, assim como correlações, até então desconhecidas, que poderão representar a solução para um dado problema (Figura 13).

2.3.3.4 Produção aditiva

Estudar a Indústria 4.0 e não referir o 3D *Printing* não faria sentido, uma vez que este tipo de equipamento trata-se dos equipamentos de industrialização e produção mais flexível, sendo um meio de aplicação de produção aditiva. De referir que qualquer ferramenta ou

equipamento programável possui a capacidade de flexibilizar a sua operação para a produção de um determinado componente é uma ferramenta da Indústria 4.0 (Figura 13).

Atualmente, a indústria possui o seu sistema produtivo orientado para produções em massa, mas na nova era que se avizinha, a produção em massa tenderá a reduzir, uma vez que os clientes possuem cada vez mais necessidades particulares, com um elevado grau de alterações face ao que é *standard*; é neste cenário que o *3D Printing* ganha gradualmente mais importância, uma vez que apresenta mais vantagens para volumes de produção menores, com especificações diferentes.

No entanto, é de salientar que para além de não ser uma ferramenta de produção vantajosa para produção em massa, verifica-se um constrangimento ao nível dos tipos de materiais em que pode ser feita a impressão, assim como o tamanho dos itens que podem ser impressos.

Os sistemas de produção aditiva são caracterizados pelo seu elevado grau de flexibilidade, agilidade, performance e descentralização da tomada de decisão, razão pela qual a sua performance ser elevada.

2.3.3.5 Robôs autónomos

Os robôs têm sido cada vez mais utilizados em diversos ramos da indústria devido à sua performance e ao rácio benefício e custo ser-lhe amplamente favorável. Estes sistemas fruto da sua evolução estão a evoluir cada vez mais, tornando-se mais autónomos e flexíveis, podendo agora interagir com outros ou até mesmo com operadores e aprender com eles (Figura 13).

2.3.3.6 *Manufacturing Execution System* (MES)

Um dos principais pilares da Indústria 4.0 é o MES, não se tratando de um *Enterprise Resource Planning* (ERP), mas de um sistema informático capaz de assegurar a coordenação de todas as áreas e departamento de uma organização (Figura 13). Devido às suas funcionalidades avançadas, a sua complexidade é elevada, sendo que, atualmente, estes sistemas só são possíveis de ser encontrados em indústrias de reconhecidas pelo seu grau elevado de industrialização, por exemplo a indústria automóvel. Este sistema possui uma vasta gama de funcionalidades, tais como:

- Cálculo do OEE, *takt-time* e WIP;

- Definição do plano de produção e respetivas ordens de trabalho, assim como realizar alterações em tempo real;
- Assegurar a coordenação do departamento de produção com o departamento de compras e logística, ao nível do inventário, movimentação de peças, consumíveis, componentes, emissão de guias de transporte e faturas
- Gestão de recursos humanos quer ao nível operacional, quer mesmo para recrutamento e demissão;
- Gestão do departamento de manutenção, através do planeamento de atividades a realizar, bem como gerir pedidos de manutenção não planeada. Para além disso possibilita a extração de indicadores de incidências, assim como indicadores de manutenção *Mean Time Between Fail (MTBF)* e *Mean Time Till Repair (MTTR)*;
- Possibilita ligar e desligar todo o tipo de equipamentos industriais;
- Incorpora as *Bill of Material (BOM)*;

A utilização do MES irá mudar o paradigma que se verifica na atualidade, uma vez que na maior parte das organizações os sistemas informáticos não estão completamente integrados, sendo comum ser utilizado um determinado *software* para gestão de produção e ser utilizado outro para o departamento financeiro e contabilístico. Assim sendo, a utilização do MES tem acima de tudo um papel agregador, que beneficiará a organização, uma vez que terá disponível a qualquer momento todos KPI, sendo assim possível realizar uma gestão mais metódica e organizada.

2.3.3.7 Simulação

O processo de simulação já é realizado pela em engenharia para simulações 3D de produtos, materiais e até mesmo processos de produção – neste momento é possível realizar uma simulação de uma linha de produção através da utilização de *software* adequado. No entanto, com a adoção e incorporação da Indústria 4.0 o âmbito destas simulações será cada vez mais alargado entre departamento. Poderá ser possível realizar uma simulação do planeamento de produção de uma linha de produção e ver em que medida afeta o departamento financeiro, de compras e logísticas, bem como as necessidades que irão surgir fruto dessa simulação. A realização das simulações em muito beneficiará o aumento da eficiência produtiva, uma vez que poderá ser feito o estudo

mais exaustivo e exato de tempos e métodos que podem ser otimizados, aumentando a produtividade (Figura 13).

2.3.3.8 Segurança informática

A Indústria 4.0 tem como princípio a interoperabilidade entre diversos sistemas, sendo assim os *softwares* de gestão e produção que são comumente fechados, passarão a necessitar de sistemas de segurança mais robustos, dado que serão mais abertos e haverá conectividade entre diversos dispositivos e sistemas em grande escala, sendo necessário adaptar estes sistemas aos riscos inerentes (Figura 13).

2.3.3.9 Realidade aumentada

A realidade aumentada trata-se de um dos pilares mais inexplorados e ao mesmo tempo com mais potencial de impacto de implementação na Indústria 4.0. Estes sistemas caracterizam-se por fornecer informações ou instruções de trabalho, através de dispositivos móveis, para os trabalhadores. Com esta informação que os colaboradores recebem em tempo real, a probabilidade de sucesso de execução de uma dada tarefa é bastante superior. A informação pode ser transmitida ao colaborador para qualquer dispositivo móvel, sendo de destacar que esta informação pode ser mostrada do campo de visão do colaborador através do uso de óculos de realidade virtual. Simultaneamente, a realidade aumentada também poderá servir para a exibição de KPI e de informações individuais ou coletivas para os colaboradores em tempo real, melhorando a troca de informações entre o mundo físico e o digital e tendo um papel de auxílio na cooperação entre homem-máquina. Esta poderosa ferramenta também permitirá realizar treino virtual, possibilitando desta forma uma formação mais prática e eficiente aos colaboradores, permitindo simular diversas situações de treino.

A Siemens, tendo como objetivo a melhoria da produtividade, do aumento de agregação de valor, através da eliminação ou diminuição de atividades de valor não acrescentado, e o aumento do nível de segurança em atividades de risco adotou este pilar da Indústria 4.0 [10]. Este projeto de implementação foi iniciado em 2018, sendo que trata-se de criar cenários de realidade virtual para treinar e formar colaboradores, através da simulação, da manutenção de turbinas eólicas. Para isso, foi desenvolvido um capacete com óculos

de realidade aumentada, que permite a detecção individual de cada peça das turbinas, assim como obter os procedimentos específicos a efetuar para cada uma delas. Estes óculos disponibilizavam aos colaboradores afetos à manutenção dados de navegação, controlos e voz e gestos e a capacidade de aceder a manuais técnicos [10]. Com a adoção desta tecnologia, a Siemens conseguiu diminuir o tempo de execução de operação em sete horas, o que anteriormente levava 8 horas a ser realizado, passou a ter um tempo de execução entre 45 a 52 minutos. Para além do aumento da eficiência produtiva devido à redução do tempo de operação, o processo de formação dos colaboradores tornou-se muito mais autónomo, diminuindo em grande escala a necessidade de instrutores durante o mesmo. Para além disso, os colaboradores sentiram um aumento da segurança as operações por eles realizada, diminuindo a margem de erro associada aos processos por os mesmos realizados (de destacar que o sistema desenvolvido envia alertas para o colaborador caso alguma tarefa do procedimento não tenha sido efetuada) [10] (Figura 13).

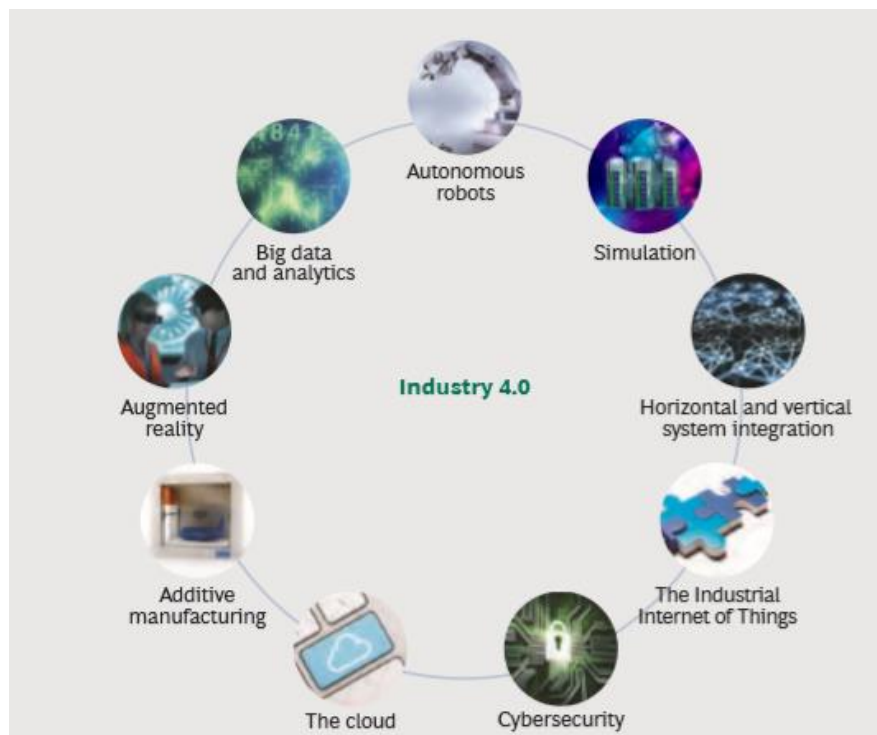


Figura 13 Nove pilares da indústria 4.0 [4]

2.3.4 Vantagens e desvantagens

2.3.4.1 Vantagens

A Indústria 4.0 irá ter impactos vantajosos em diversos aspetos, quer ao nível social, quer ao nível ambiental e económico [61]:

1. Promove o aumento pela procura de profissionais cada vez mais qualificados, que tenham a capacidade de trabalhar num ambiente caracterizado por uma grande componente tecnológica;
2. Sistema produtivo com maiores índices de eficiência, levando a resultados económico-financeiros cada vez mais satisfatórios;
3. Sistema produtivo mais ágil e flexível, capaz de dar resposta com maior facilidade a picos de produção, assim como a alterações de especificações de determinados produtos e/ou componentes;
4. A introdução de novos produtos é mais célere, devido ao elevado grau de agilidade do sistema e à sua capacidade de adaptação;
5. O cliente terá cada vez maior poder de escolha e de determinar o produto, sendo que a sua experiência pressupõe-se ser cada vez mais satisfatória;
6. Criação de novos modelos de negócio;
7. A monitorização dos equipamentos industriais levará à criação e/ou alteração de políticas de manutenção, reduzindo assim as taxas de falhas dos equipamentos, contribuindo assim para o aumento do OEE dos mesmos;
8. O uso mais racional de matérias primas e de sistemas energéticos, promove a conservação do meio ambiente.

2.3.4.2 Desvantagens

1. Possível vulnerabilidade na segurança, dado que os sistemas irão estar todos em rede, podendo ocorrer problemas de segurança quer de informação quer do sistema físico em si. Assim sendo, deverão ser estabelecidos procedimentos que garantam a segurança destes sistemas. Tópicos como propriedade intelectual, dados pessoais, operabilidade das organizações, proteção do ambiente, saúde e segurança dos trabalhadores deverão ser salvaguardados [15]. A necessidade de segurança e proteção digital obrigará a um trabalho cooperativo entre governos,

- organizações especializadas em tecnologias de informação e indústria, por forma a em conjunto desenvolver e adotarem soluções adequadas e que sejam boas práticas;
2. Um dos princípios da Indústria 4.0 é a interoperabilidade dos sistemas, para tal será necessária a adoção de uma padronização que sirva como arquitetura referência, que forneça uma descrição técnica de normas e simultaneamente garanta uma comunicação eficiente entre todos os sistemas e subsistemas. Caso tal não seja garantido, iremos ver verificar que o que aconteceu na última década com o surgimento da IOT: os diversos sistemas de diferentes organizações geram uma quantidade enorme de dados, mas que são bastante heterogêneos, sendo que o tratamento desta informação torna-se bastante difícil e não no tempo adequado [33]. Isto iria impossibilitar uma abordagem global e padronizada de análise, processamento e armazenamento de informações, sendo que neste cenário a abordagem da Indústria 4.0 estaria limitada à produção, impossibilitando desta forma a capacidade de criar economias de escala e obtenção de ganhos de produtividade significativos [15].
 3. Produzir num ambiente em que está implementada a Indústria 4.0 exige a que sejam realizadas mudanças nas organizações ao nível da organização do trabalho. O conceito da Indústria 4.0 é caracterizado por ser um sistema flexível capaz de fornecer produtos customizados com custos reduzidos, sendo que desta forma o ambiente produtivo deverá ser capaz de ser adaptável aos processos [33]. A Indústria 4.0 pressupõe que os processos repetitivos ou de uma ergonomia difícil sejam realizados por máquinas, tendo os colaboradores um papel mais proativo e criativo. Novas interfaces homem-máquina serão necessárias, com o intuito de criar métodos de interação mais eficientes, tais como reconhecimento de voz ou gestual;
 4. A Indústria 4.0 tem como um dos desafios mais críticos as pessoas, uma vez que os ambientes industriais registarão mudanças significativas quer na conceção quer na produção de produtos e serviços [4]. Estas mudanças serão possíveis graças à implementação de sistemas tecnológicos altamente evoluídos e que exigirão colaboradores com competências muito específicas. As organizações para fazer face a este problema poderão utilizar colaboradores de outros países, no entanto,

poderão depois verificar-se problemas de inadaptação cultural. Outro método para fazer face a este ponto é que estas organizações terão de comprometer-se em investir em programas de formação contínua, que possibilitem que os colaboradores sejam capazes de trabalhar com novas ferramentas e tecnologias;

5. As pequenas e médias empresas são responsáveis por cerca de 20% dos postos de trabalho na indústria na União Europeia [77]. Neste contexto foi identificada a necessidade de criar soluções para que as PME consigam também incorporar o paradigma da Indústria 4.0. Tal é necessário devido à própria sustentabilidade das pequenas e médias empresas e por outro lado, com esta adoção, iria-se aumentar ainda mais o número de organizações a integrar a cadeia de valor, que levaria à obtenção de ganhos económico-financeiros ainda mais satisfatórios [15].

2.4 MANUTENÇÃO

2.4.1 Evolução histórica e conceito de manutenção

A manutenção, segundo as normas europeias, é definida como sendo a combinação das ações técnicas, administrativas e de gestão que são registadas durante o ciclo de vida de um dado produto, tendo como objetivo que o mesmo se mantenha a executar a função desejada ou, caso seja necessário, proceder à sua reparação [13]. De destacar que para além dos custos de produção, os custos de manutenção também têm uma elevada preponderância naquilo que são os resultados operacionais das organizações. Tal acontece uma vez que o mercado encontra-se cada vez mais global, levando a que a produtividade, qualidade e disponibilidade tenham cada vez mais um papel importantíssimo no seio das organizações e também a que as organizações para poderem competir neste mercado estejam a laborar com margens de lucro mais baixas. Já segundo Murthy, em 1999, os equipamentos industriais deterioram-se mediante a sua idade e a sua taxa de utilização, sendo que esta degradação pode provocar o surgimento de falhas com um impacto negativo sobre o negócio [46]. Desta forma, cabe à manutenção executar as ações necessárias para realizar o controlo das falhas e manter os equipamentos com o maior índice de disponibilidade possível.

Entre 1940 e 1950 ações de manutenção ocorriam apenas quando um dado equipamento deixava de executar corretamente as suas funções, estando assim perante o caso de manutenção corretiva [39]. Entre 1960 e 1970, verificou-se o aumento da complexidade e desenvolvimento tecnológico, sendo que os equipamentos passaram a ter, regra geral, um ciclo de vida longo. Uma vez que houve um aumento tecnológico e conseqüentemente um ganho de capacidade produtiva substancial, a manutenção começou a ser vista com maior importância e responsabilidade, dado que o impacto financeiro e operacional de um dado equipamento não executar corretamente a sua função tinha impacto cada vez maior. Durante este período a manutenção preventiva tomou a sua importância, sendo que esta era realizado em intervalos temporais fixos e foram desenvolvidos sistemas de planeamento e controlo de manutenção. A terceira geração surge a partir de 1980, onde o aumento do desenvolvimento tecnológico tornou-se exponencial e simultaneamente verificou-se uma grande competitividade à escala global. Este período é caracterizado pelo fator de disponibilidade ter ainda mais importância e também pelo surgimento da metodologia JIT, que trabalha com níveis de *stock* de matérias primas e componentes bastante reduzidos, estando deste modo uma organização muito dependente da fiabilidade dos fornecedores, uma vez que segundo esta metodologia os materiais e matérias primas devem só chegar quando são necessários. Fruto da competitividade existente, os clientes simultaneamente exigem padrões de qualidade mais elevados, havendo cada vez menos espaço para que os equipamentos não executem corretamente as suas funções. Face a isto, a manutenção ganhou uma preponderância enorme dentro das organizações, com a criação de departamento específicos da área, o seu peso no orçamento anual das organizações subiu e novas políticas de manutenção surgiram, tais como a manutenção condicionada, *Reliability Centered Maintenance* (RCM) e o TPM.

A manutenção tem como principais objetivos [43][21][72]:

- I. Manutenção do equipamento operacional existente na fábrica – esta ação representa a tarefa principal da existência de departamentos de manutenção nas organizações. Cabe às equipas de manutenção realizar todas as ações necessárias para que as máquinas apresentem os índices de disponibilidade satisfatórios e que ao mesmo tempo o seu funcionamento seja economicamente rentável. Também

tem como função antecipar, sempre que possível, as reparações de uma forma preventiva para diminuir o mais possível o custo por perda de produção;

- II. Manutenção das infraestruturas e área da fábrica – diz respeito a ações de reparação de edifícios e equipamentos de suporte que façam parte da fábrica, ainda que não tenham intervenção direta no fluxo produtivo;
- III. Aproveitamento máximo dos recursos de manutenção – cada vez mais a manutenção tem um peso significativo nas organizações, sendo que para além das ações de manutenção diretas, normalmente estas equipas também são responsáveis pela gestão de peças sobresselentes, contratação em regime de *outsourcing* para ações de manutenção específicas. Assim sendo, é necessário garantir que haja uma gestão eficiente e criteriosa de todos estes recursos;
- IV. Redução do número de peças sobresselentes – este é um dos grandes objetivos da manutenção e ao mesmo tempo dos mais árduos, se por um lado estes departamentos não querem correr o risco de não ter as peças sobresselentes necessárias em *stock*, as organizações querem ao máximo reduzir os custos de posse. Para determinar o ponto de equilíbrio desta equação é necessário antecipar estas necessidades através de tecnologias de manutenção preventiva, por forma a requisitar esses componentes com a antecedência necessária. Para além disso, também existem algoritmos para cálculo de número de peças sobresselentes recomendadas;
- V. Maximizar a vida útil máxima do equipamento – uma das formas de reduzir os custos de manutenção é alongar o quanto possível a vida útil dos equipamentos;
- VI. Capacidade de reação rápida – apesar das técnicas de manutenção preventiva e condicionada, ocorrerão sempre falhas aleatórias, não sendo possível a sua deteção, para fazer face a este problema é necessário garantir que a equipa de manutenção encontra-se sempre preparada e equipada para reagir eficientemente face a uma avaria inesperada;

- VII. Introdução de ações de melhoria – através de estudos técnicos e do *know-how* adquirido empiricamente, sugerir melhorias e/ou alterações necessárias que visem o aumento da disponibilidade da máquina e/ou redução dos custos de manutenção;
- VIII. Garantir a segurança da unidade industrial, bem como de todos os colaboradores pertencentes, assim como manter a limpeza e higiene conforme as normas;
- IX. Promover o uso racional e eficiente das fontes de energia utilizadas, tais como o vapor de água, ar comprimido, eletricidade, água, gás natural, gásóleo, bem como garantir o correto funcionamento destes equipamentos;
- X. Trabalhar em conjunto com o departamento de produção – prestar auxílio na elaboração do procedimento de conservação rotineiro que os colaboradores devem efetuar nos equipamentos, bem como formá-los.

2.4.2 Tipos de manutenção

Podemos dividir a manutenção em dois blocos principais: planeada e não planeada. A manutenção corretiva é colocada em prática quando uma avaria ocorre de uma forma inesperada ou um equipamento não está a trabalhar segundo o desempenho pré-estabelecido, não havendo qualquer tipo de planeamento do trabalho que tem de ser executado, sendo neste caso não planeada [9]; caso houvesse instruções de trabalho a efetuar, estava-se perante manutenção corretiva planeada. A manutenção preventiva trata-se de uma metodologia de manutenção planeada e segundo a *European Standard EN 13306* [7] é a “*manutenção efetuada a intervalos de tempo predeterminados ou de acordo com critérios prescritos com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem*”. A implementação desta metodologia de manutenção tem como objetivos principais diminuir e se possível eliminar os tempos de paragens não previstos das máquinas e a degradação prematura de um dado item, o que levaria à necessidade de adoção de políticas de manutenção corretiva. A manutenção preventiva pode recorrer a duas metodologias diferentes: a manutenção sistemática e a manutenção condicionada. A manutenção sistemática ou manutenção baseada do tempo segundo Fore e Msipha [18], “*é a manutenção preventiva executada a intervalos de*

*tempo preestabelecidos ou segundo um número definido de unidades de funcionamento, integrando as ações daí decorrentes". A manutenção condicionada "é a manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes" [7]. A manutenção preditiva de decorre da manutenção condicionada é definida "como a manutenção condicionada efetuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem" [7]. A monitorização dos equipamentos pode ser efetuada de uma forma contínua ou periódica. A manutenção preditiva pode ser implementada através de *condition monitoring* (baseada na fiabilidade), ou seja, diagnóstico de aproximação de avaria, sendo realizadas análise de vibrações, análise de temperatura, entre outros ou através de *on condition* (baseada na condição), sendo que esta técnica mais relacionada com o estado do equipamento: folgas visíveis, rendimento atual, ruídos anómalos, entre outros.*

Mediante os autores, existem diferentes divisões das tipologias de manutenção, sendo que segundo Mobley [43] e Cabral [9] a manutenção pode ser dividida em três tipologias distintas: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção de melhoria. A manutenção de melhoria tem como objetivo principal a diminuição ou até mesmo se for possível a eliminação da manutenção, englobando ações de manutenção automática.

Tal como já foi referido nesta dissertação, a gestão de manutenção tem como objetivo principal assegurar o melhor índice de disponibilidade operacional das máquinas ao menor custo possível, sendo que este objetivo só pode ser atingido utilizando a manutenção planeada, uma vez que é a única que apresenta uma atitude proativa e não uma atitude reativa [9].

2.4.3 Conceito de fiabilidade

A fiabilidade, só começou a ser realmente estudada e desenvolvida da década de 50, aliada à segunda geração da manutenção, sendo que foi a partir desta data que começaram a ser desenvolvidos modelos capazes de analisar a fiabilidade [52]. Tal como é fácil de compreender, esta análise foi primeiramente aplicada nas indústrias automóveis e de comunicações, devido a serem organizações mais evoluídas e com necessidades

acrescidas, assim como na indústria militar, uma vez que neste caso a fiabilidade está muito aliada à segurança.

Segundo a norma NP EN 13306 [7] entende-se por fiabilidade a “aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um intervalo de tempo”. Assim sendo, no estudo da engenharia de fiabilidade define-se a fiabilidade como sendo a probabilidade de sucesso desse acontecimento. Ainda segundo a mesma norma a avaria “é a manifestação da inaptidão de um dado item realizar um determinado padrão de desempenho previamente especificado” e, segundo Pereira e Sena [52], a falha define-se como sendo o fim da capacidade de um sistema, subsistema ou componente executar a função requerida.

Os modelos de análise de fiabilidade representam matematicamente um dado processo: “um modelo de fiabilidade é determinado por um dado número de condições sobre as falhas dos elementos constituintes de um sistema e do próprio sistema [52]. Quando tomadas em conjunto, aquelas condições formam o modelo no qual se vão basear os cálculos fiabilísticos”. Os modelos de análise de fiabilidade poderão ser funcionais, estatísticos ou determinísticos, tendo como objetivo comum prever quando é que um determinado modo de falha poderá vir a ocorrer. Assim sendo, estas análises permitem calcular e posteriormente analisar qual a probabilidade de sucesso (fiabilidade) ou de falha associada a um determinado item mediante a sua idade, tempo de funcionamento ou número de ciclos efetuados.

Associada ao conceito de fiabilidade e suas análises, surge a curva da banheira (Figura 14), que representa graficamente a taxa instantânea de falhas de um dado item, isto é, o número de avarias por unidade de tempo. De referir que as três fases que constituem a curva da banheira podem ser analisadas e modificadas através de distribuições estatísticas, como por exemplo a distribuição exponencial, a distribuição normal a distribuição de *Weibull* [14].

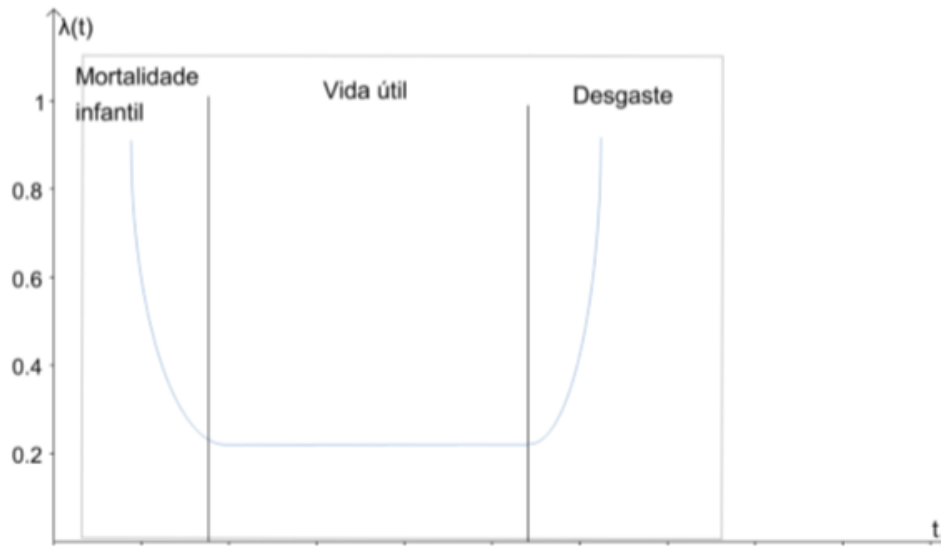


Figura 14 Exemplo de representação da curva da banheira [17]

O comportamento desta curva está dividido em três fases distintas (Figura 14):

- I. Mortalidade infantil – nesta fase verifica-se uma taxa instantânea de falhas elevada que vai decrescendo, sendo que as falhas que ocorrem nesta fase dizem respeito a mortalidade infantil, devido por exemplo a erros de projeto ou produção;
- II. Vida útil – neste período verifica-se uma taxa instantânea de falhas constante, representando assim o período de utilização normal, sendo que considera-se que nesta fase as falhas ocorrem devido a fenómenos aleatórios;
- III. Desgaste – devido à idade avançada ou tempo elevado de funcionamento, o item começa a apresentar um desgaste (degradação), levando a que a taxa instantânea de falhas comece a subir.

Associado ao conceito de fiabilidade, surge o conceito de disponibilidade, sendo que este representa a capacidade de um dado item desenvolver uma dada função durante um intervalo de tempo determinado. O aumento dos índices de disponibilidade dos sistemas é um dos maiores objetivos de todos os diferentes modelos de manutenção, uma vez que pretende-se diminuir ao máximo o rácio custo de manutenção sobre o período de funcionamento. A disponibilidade pode ser calculada dividindo o *Mean Time to Failure*

(MTTF) pela soma do MTTF com o MTTR. O MTBF é calculado através da soma do MTTF com o MTTR.

3. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA *KAIZEN-LEAN* E INDÚSTRIA 4.0 NA MANUTENÇÃO

3.1 CONCEITOS GERAIS DE MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é uma das invenções mais importantes no processo de desenvolvimento tecnológico da humanidade, vindo substituir o homem em tarefas árduas e repetitivas. Esta tipologia de máquinas é responsável por transformar energia elétrica em energia

mecânica, utilizando para isso a eletricidade para criar campos magnéticos que se opõem entre si, provocando o movimento da parte giratória designada por rotor. Se nada mais houvesse, quando os polos se alinhassem o motor iria parar, logo, para que o rotor continue a sua marcha, é necessário que a polaridade do eletroímã se inverta.

3.1.1 Vibração nos motores elétricos

A análise de vibração é um dos métodos mais utilizados pelos departamentos de manutenção para a monitorização da condição dos motores elétricos, permitindo a realização de manutenção preditiva através da realização de estudos de fiabilidade e consequentemente previsão de falha. Por norma, vibrações indevidas podem verificar-se devido a mau alinhamento, ressonância das fundações, desequilíbrio do acoplamento, danos nos rolamentos, desequilíbrio de fases, entre outros [40]. A amplitude das vibrações pode, atualmente, ser medida com uma precisão elevada, no entanto é necessário ter em conta que os limites admissíveis de amplitude diferem de motor para motor. A vibração pode assumir duas formas, consoante a direção do movimento, podendo assim ser numa direção radial (em direção ao exterior) ou axial (paralelo ao eixo). Como exemplo, um desequilíbrio num motor, deverá causar uma vibração radial, já que o ponto de desequilíbrio do motor gira, criando uma força centrífuga que puxa o motor para fora, enquanto o eixo se vai deslocando 360°. Por sua vez, o desalinhamento do eixo pode causar vibração numa direção axial (para trás e para a frente paralelamente ao centro do eixo) devido ao desalinhamento no dispositivo de engate do eixo.

As falhas mecânicas mais comuns que a análise de vibração deteta são [40]:

- I. Desequilíbrio – Em qualquer componente rotativo, quando um peso desequilibrado roda à volta do eixo da máquina são causadas vibrações anormais, tornando-se tanto maior quanto maior for a velocidade de operação da máquina. O desequilíbrio pode ter como origem defeitos de fabrico (erros de projeto e falhas de desempenho), ou uma manutenção ineficiente (pás do ventilador deformadas ou sujas, falta de pesos de equilíbrio). O desequilíbrio é um dos principais causadores da diminuição da vida útil dos rolamentos do motor, bem como uma das principais origens de vibrações anormais na máquina.

- II. Desalinhamento – A vibração pode igualmente ser causada quando os eixos da máquina se encontram desalinhados. Esse desalinhamento angular ocorre quando os eixos não estão paralelos. Em situações em que os eixos estão paralelos, mas não perfeitamente alinhados, denomina-se que se está perante uma situação de desalinhamento paralelo. O desalinhamento pode ter como origem uma incorreta montagem inicial, ou após uma intervenção incorreta os componentes tenham sido mal montados, e, por fim, o próprio tempo de funcionamento dos componentes e a sua degradação. A vibração pelo desalinhamento pode ser tanto radial como axial, ou ambos.
- III. Desgaste – Em qualquer tipo de motor, peças como esferas, rolamentos, engrenagens e correias de transmissão são expostas ao desgaste devido à sua utilização normal, que progressivamente vai aumentando os níveis de vibração.
- IV. Montagem – Uma vibração que inicialmente possa passar despercebida pode tornar-se mais observável e destrutiva se um componente que apresenta essa vibração possua rolamentos soltos ou se encontra ligado aos seus componentes com folgas. Essas folgas podem não ser a origem da vibração, no entanto pode levar à libertação da máquina da sua base, podendo aumentar o nível de desgaste dos componentes da mesma.

3.2 CASO PRÁTICO – ABORDAGEM *KAIZEN-LEAN* PARA AUMENTAR EFICIÊNCIA DE MANUTENÇÃO NUM MOTOR

O caso prático teve aplicação na indústria para fabrico de pasta de papel, mais concretamente em motores elétricos. A fábrica está equipada com mais de 4500 motores elétricos em todo o seu processo de fabrico, sendo alguns deles críticos e fundamentais para a continuidade do processo de produção de forma contínua. Este caso prático refere-se à aplicação da metodologia de melhoria contínua *Kaizen-Lean* [28] no motor acoplado ao ventilador do acionamento de ar secundário (430M3703) da caldeira de recuperação 4 (CR4), com o objetivo de aumentar a eficiência da manutenção deste motor, através da eliminação dos *mudas* a ele associados, aumentando

consequentemente o seu OEE. Para tal, foi aplicada uma das ferramentas principais da metodologia *Kaizen*, a ferramenta 3C [30].

3.2.1 Caso

A escolha do equipamento recaiu sobre o motor acoplado ao ventilador do acionamento de ar secundário da CR4, devido ao seu comportamento problemático ao longo dos últimos 12 anos e devido ao seu carácter crucial para o funcionamento da CR4 (Figura 15). O fabricante deste motor é a WEG EFACEC, sendo um motor que apresenta uma potência de 500kW e um índice de proteção IP55.



Figura 15 Motor do ventilador de ar secundário.

Devido à sua criticidade e ao baixo índice de fiabilidade, é efetuada a este motor a monitorização dos valores de vibração, sendo que tal é efetuado quer pontualmente quer sob rotinas, sendo a sua medição efetuada numa das alhetas.

Os problemas identificados referem-se à capacidade insuficiente de ventilação, quebra total do seu funcionamento – falha -, provocando deste modo paragem da linha de produção, levando a que os colaboradores estejam parados até que a manutenção corretiva seja efetuada, bem como os desperdícios de retrabalho no caso de se verificarem defeitos na pasta de papel produzida e a problemas de segurança. Dado que a manutenção é efetuada de uma forma corretiva, por vezes não há os componentes necessários para efetuar a manutenção, impossibilitando a execução da mesma, bem como às vezes não é possível intervir imediatamente no equipamento, levando a que este esteja parado à espera de intervenção devido à inexistência de um planeamento de manutenção com base na monitorização contínua do funcionamento do equipamento.

No caso em questão, o facto de ser realizada manutenção sob forma corretiva, aumenta os custos da manutenção deste equipamento, uma vez que aos custos dos materiais necessários para a sua reparação ou substituição, bem como da mão de obra do departamento de manutenção é necessário somar os custos perdidos por perda de produção.

O objetivo da implementação da metodologia *Kaizen-Lean* neste caso é eliminar os *mudas* referidos anteriormente, aumentando desta forma o OEE do equipamento, através de mudanças na forma como a manutenção do equipamento é efetuada, querendo eliminar o carácter reativo e passando a apresentar uma manutenção proativa, com vista à apresentação de resultados “zero defeitos”.

3.2.2 Causa

Dado o histórico de 12 anos de funcionamento do equipamento nas instalações, o departamento de manutenção já possui os principais motivos do baixo índice de fiabilidade, devendo-se principalmente a avarias nos rolamentos e a desequilíbrios do rotor. A principal causa de avaria dos rolamentos deve-se ao desgaste existente da película cerâmica protetora e isolante dos rolamentos, permitindo desta forma a passagem de corrente elétrica o que leva à sua deterioração (Figura 16). O desgaste do isolamento cerâmico tem como origem principal a própria vibração do ventilador, sendo que desta forma, através da análise de vibração, é possível detetar a avaria assim como a sua origem.



Figura 16 Exemplo de rolamento danificado

No entanto, é o desequilíbrio do rotor a origem mais comum de problemas neste motor, devido à acumulação de materiais nas pás do ventilador. Em condições processuais

correntes, o ar que passa pelo ventilador é relativamente limpo e seco, no entanto, pontualmente, devido a motivos processuais é necessário efetuar o desvio de gases condensáveis e sujos para este ventilador, levando à acumulação de partículas nas pás do ventilador, provocando o seu desequilíbrio e consequentemente transmitindo vibrações ao motor, contribuindo assim para o surgimento de avarias no mesmo.

Tal como referido anteriormente, o departamento de manutenção realiza ações de carácter corretivo, mediante medições de vibração pré estipuladas no tempo, sendo que o risco de não deteção atempada de uma possível falha é considerável, o que poderá a levar a uma perda total de funcionamento do sistema, quebras de rendimento e que falhas ocorram e não sejam detetadas. Para além disso, o facto de as medições serem efetuadas manualmente por diversos elementos da equipa de manutenção pode levar a que sejam efetuadas medições de uma forma diferente ou que exista erro de leitura do colaborador. Deste modo, podemos concluir que a política de manutenção corretiva não é a adequada face ao seu grau de criticidade do sistema bem como a fiabilidade apresentada, assim como a inexistência de um plano de manutenção, neste caso a limpeza das pás, para o equipamento em questão, a inexistência de uma política de melhoria contínua de manutenção e uma monitorização não contínua dos valores de vibração do equipamento (Figura 17).





- Eliminação da causa principal 
- Substituição do motor 
- Sistema redundante 
- Sistema de monitorização contínuo de vibração 

Figura 17 Análise de causas

3.2.3 Contramedida

Durante a análise deste problema foram pensadas várias possíveis melhorias, bem como analisada a sua possível implementação:

- I. Eliminação da causa principal – tal como foi referido anteriormente, por motivos processuais é necessário efetuar o desvio de gases condensáveis e sujos para este ventilador com o intuito de garantir os níveis de pressurização de outros sistemas. Sendo que não se verificou como possibilidade a alteração do processo produtivo que iria eliminar a passagem destes gases pela CR4;
- II. Substituição do motor – apesar do motor apresentar elevado índice de falhas e consequentemente baixo OEE, pela análise de causas elaborada anteriormente foi possível concluir que o problema não está no motor mas sim às oscilações de peso das pás que a ele estão acopladas. Assim sendo, a sua substituição não iria resolver o problema;
- III. Sistema redundante – dado que é um equipamento crucial para a produção, foi pensada como solução a aplicação de um sistema redundante, deste modo, quando um motor não estivesse a funcionar corretamente, o outro seria ativado, permitindo ao departamento de manutenção realizar a ação de manutenção corretiva. No entanto, há um constrangimento de espaço, pelo que não é possível a sua execução;
- IV. Sistema de monitorização contínuo de vibração através do recurso a um dispositivo da Indústria 4.0 – um dos problemas detetados foi que a monitorização da vibração do motor, ponto crucial para a caracterização do funcionamento do mesmo, era efetuada pelo departamento de manutenção sob intervalos de tempo pré-estabelecidos e alguns esporádicos. Deste modo, pensou-se aplicar um sistema de monitorização, com possibilidade de ser contínuo, com o objetivo de mudar o paradigma da forma como a manutenção é efetuada neste equipamento, tendo como objetivo passar a ser efetuada a manutenção preditiva baseada na condição.

3.2.3.1 Aplicação do sistema de monitorização *WEG Motor Scan 4.0*

Os objetivos da implementação do *WEG Motor Scan 4.0* são a monitorização contínua do motor da CR4 e a aplicação da manutenção preditiva com base na condição através dos dados obtidos pela monitorização. Esta solução coloca a Indústria 4.0 e a manutenção a trabalhar em conjunto com o intuito de atingir os objetivos *Kaizen-Lean* neste caso em específico.

Este sistema de monitorização aplica princípios da Indústria 4.0 como a interoperabilidade, virtualização e operação em tempo real [54]. Em relação à interoperabilidade baseia-se na comunicação entre o sensor de vibração e o departamento de manutenção, que analisa, controla e age sobre os dados obtidos através da plataforma *WEG Motor Scan* [81]; para além disso, a aplicação deste sistema tem também como princípio a virtualização e a operação em tempo real, que na prática permite que o departamento de manutenção monitorize em tempo real o comportamento do motor de uma forma virtual. Já a aquisição dos dados de vibração pelo departamento de manutenção é sustentada por três pilares da Indústria 4.0 [3][4], sendo eles a *Industrial Internet of Things*, *Cloud* e *Big Data Analytics*. Esta aplicação de um sistema de indústria 4.0 em consonância com a manutenção também faz-se suportar segundo os pilares da política de manutenção TPM, como a manutenção planeada, a qualidade e a segurança referidos anteriormente [30].

Assim sendo, foi desenvolvido o modelo conceptual de implementação do sistema de monitorização, para solucionar o problema detetado (Figura 18).

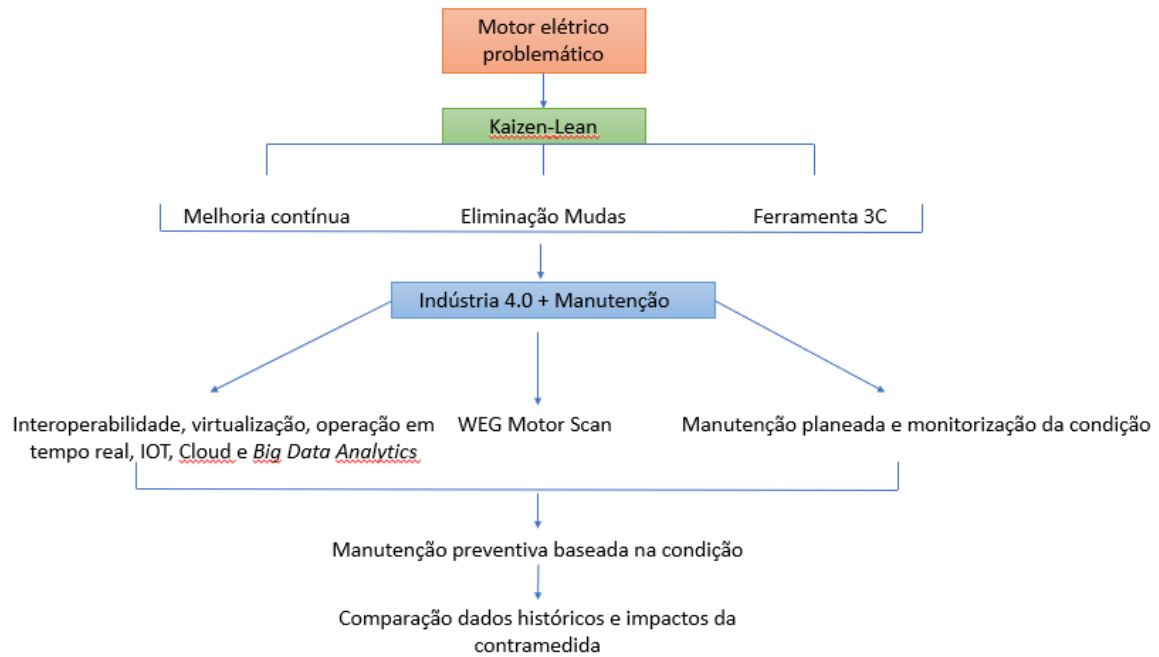


Figura 18 Modelo conceptual de implementação do sistema de monitorização

3.2.3.1.1 Aplicação prática

A instalação física do equipamento é fácil e rápida, para isso, basta fazer um pequeno furo numa das alhetas dos motores e aparafusar o sensor *Motor Scan* segundo instruções do manual (Figura 19), sendo que o mesmo é um dispositivo portátil, alimentado por bateria [81]. O equipamento vem pré calibrado não sendo necessária nenhuma intervenção adicional. Para o registo e configuração do equipamento é necessário instalar no telemóvel ou PC a aplicação da WEG *Motor Scan* e preencher todos os dados relativos ao motor [81]. Por outro lado, para obter acesso aos dados obtidos pelo equipamento é necessário o registo na plataforma *IOT* da WEG [80].



Figura 19 Instalação do sensor *Motor Scan* no motor da CR4

O sensor capta os dados do motor, envia ao *smartphone* ou *tablet* via *bluetooth* ou *gateway* e envia por *wi-fi* todas as informações para a *cloud*, que armazena e processa os dados e transforma-os em relatórios e os transmite para a *WEG IOT Platform*, onde podem ser acessados num computador ou outros dispositivos inteligentes (Figura 20) [80]. O sensor tem a capacidade de efetuar medições de diferentes características como a vibração, temperatura e tempo de funcionamento do equipamento onde está a ser efetuada a medição. O sensor foi aplicado no dia 29-03-2019 no motor da CR4 e esteve em operação contínua até dia 13-04-2019.

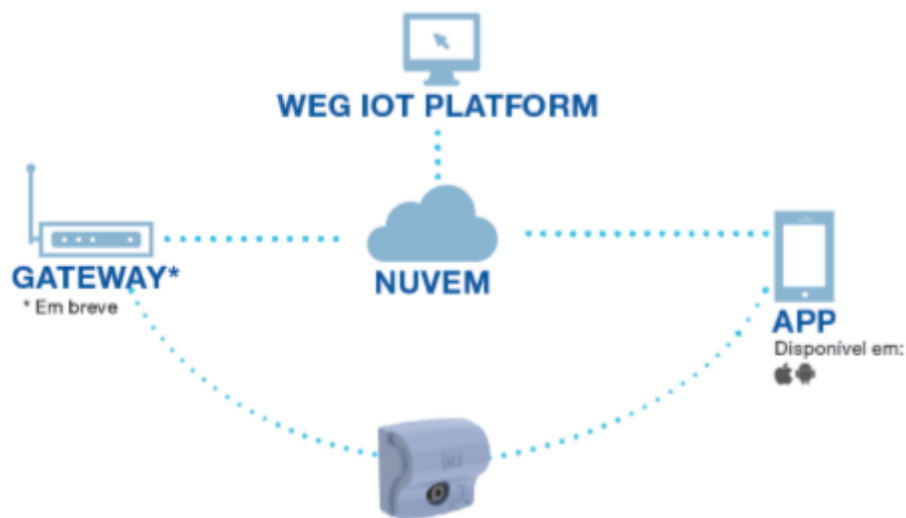


Figura 20 Fluxo de aquisição de dados [81]

O *WEG Motor Scan* mede a vibração (mm/s) eficaz ou *Root Mean Square* (RMS) em 3 eixos (A Axial, Rx Radial X, e Ry Radial Y) conforme indicado na figura 21.

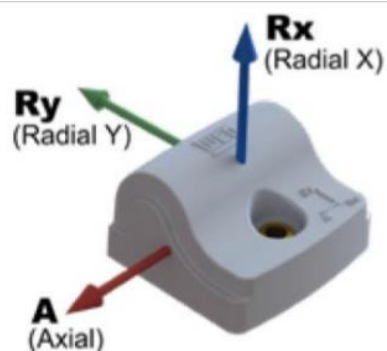


Figura 21 Vetores medidos da RMS do *WEG Motor Scan* [81]

O registo do nível RMS de vibração e a avaliação de tendências e padrões de funcionamento são usados para indicar alterações circunstanciais ou permanentes na aplicação. Com isso, é possível uma avaliação mais precisa para determinação da causa da mudança e se é uma falha na máquina.

A aplicação permite aceder ao histórico do registo, alertas e eventos ocorridos, dados para manutenção, localização, informação do motor e do sensor, através do *WEG IOT Platform* [81] (Figura 22). Nesta figura é possível ao departamento de manutenção obter os valores de vibração axial e radial, a temperatura de funcionamento do equipamento e o tempo de operação do mesmo e se o sensor se encontra a efetuar a medição no instante atual.

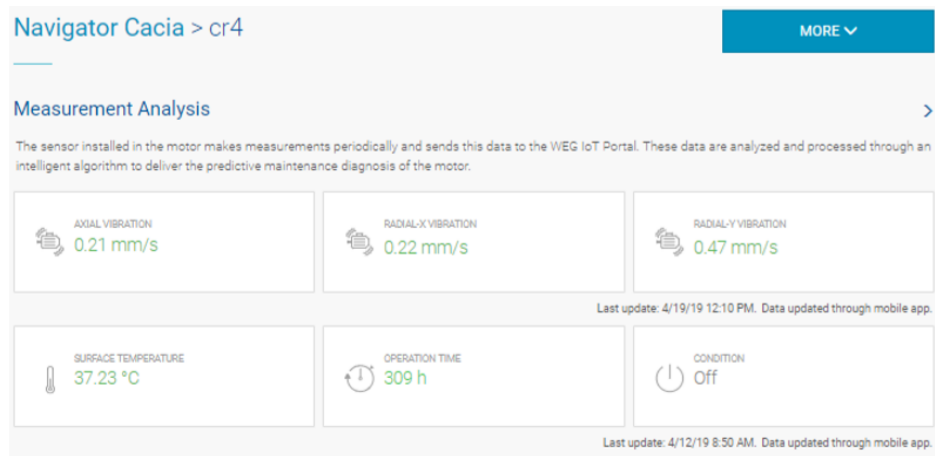


Figura 22 Menu de visualização do portal *WEG IOT* [80]

Este sistema também permite que os alertas criados pelo *WEG IOT* podem ser parametrizados, sendo que os níveis de vibração e respetivos limites são os representados na Tabela 3, sendo que o motor em causa em os limites definidos correspondentes a uma potência superior a 300 kW em base flexível.

Tabela 3 Limites dos níveis de alerta e dos níveis críticos de vibração [81]

| Velocidade de Vibração RMS [mm/s] | Potência ≤ 300kW Grupo 2 da ISO 10816-3 | | Potência > 300 kW Grupo 1 da ISO 10816-3 | |
|-----------------------------------|--|---------------|---|---------------|
| | Base Rígida | Base Flexível | Base Rígida | Base Flexível |
| $V \leq 2.8$ | Normal | Normal | Normal | Normal |
| $2.8 < V \leq 5.6$ | Alerta | Normal | Alerta | Normal |
| $5.6 < V \leq 8.9$ | Crítico | Alerta | Crítico | Alerta |
| $8.9 < V \leq 13.8$ | Crítico | Crítico | Crítico | Alerta |
| $V > 13.8$ | Crítico | Crítico | Crítico | Crítico |

Legenda:

| | |
|---------|---------|
| Normal | NORMAL |
| Alerta | ALERTA |
| Crítico | CRÍTICO |

O nível de alerta normal corresponde a uma condição normal de operação, o de alerta sugere a realização de uma intervenção preventiva no motor para aprimorar o diagnóstico detetado e o crítico sugere uma intervenção imediata de manutenção corretiva no equipamento, sendo que é possível observar os níveis de alerta atuais na plataforma IOT (Figura 23).

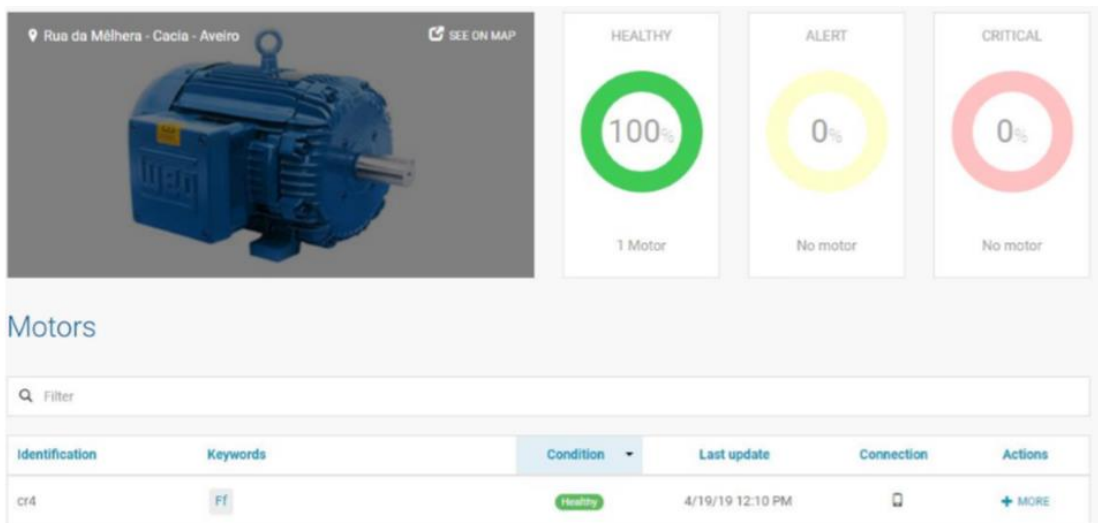


Figura 23 Exemplo de níveis de criticidade [80]

Com a aplicação deste sistema de manutenção suportado pela Indústria 4.0, o departamento de manutenção pode realizar a manutenção do equipamento baseado na condição do mesmo, através da sua monitorização em tempo real, permitindo assim reduzir de uma forma séria o número de intervenções corretivas e aumentando as ações preventivas, que neste caso correspondem à limpeza das pás acopladas ao motor. Em seguida, é apresentado o caso de detetado no dia 02 de abril de 2019, em que foi

detetada uma vibração radial no eixo X de 10.75 mm/s, o que corresponde ao nível de alerta (Figura 24), através da monitorização da vibração realizada pelo sensor.



Figura 24 Vibração radial X a 02-04-2019 [80]

O departamento de manutenção recebendo este alerta e não se tratando de um nível crítico, conseguiu em conjunto com o departamento de produção planejar uma intervenção de manutenção preventiva para o dia seguinte, levando a que o valor da vibração após a limpeza das pás acopladas ao rotor voltasse a estar dentro dos parâmetros aceitáveis de 1.45mm/s (Figura 25).

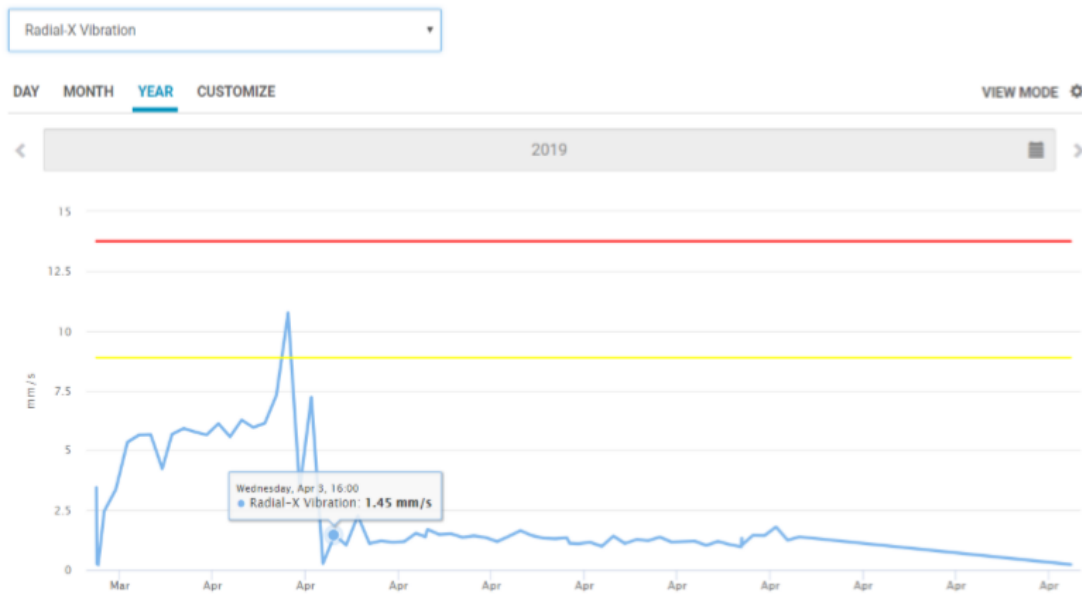


Figura 25 Vibração radial X a 03-04-2019 [80]

3.2.4 Verificação das contramedidas

Após ser implementada a ação de contra melhoria, neste caso a aplicação de WEG Motor Scan como ferramenta para a manutenção de motor da CR4 é necessário avaliar a eficiência da sua implementação [30]. Assim sendo, foi realizada a comparação dos valores de vibração no motor da CR4 obtidos quer pelo departamento de manutenção e pela leitura efetuada pelo sensor (Tabela 4).

Tabela 4 Comparação dos valores de vibração medidos

| Data | Hora de medição do valor de vibração da manutenção | Vibração radial X medida pelo colaborador do departamento de manutenção (mm/s) | Hora de medição do valor de vibração do sensor | Vibração radial X medida pelo <i>WEG Motor Scan</i> (mm/s) |
|------------|--|--|--|--|
| 01-04-2019 | 12.12 | 5.4 | 10.00 | 5.57 |
| 01-04-2019 | 16.14 | 4.25 | 16.00 | 6.27 |
| 01-04-2019 | 23.32 | 3.41 | 22.00 | 5.96 |
| 02-04-2019 | 17.35 | 7.41 | 16.00 | 10.75 |
| 03-04-2019 | 14.49 | 1.38 | 16.00 | 1.45 |
| 04-04-2019 | 11.48 | 1.14 | 10.00 | 1.1 |
| 05-04-2019 | 09.41 | 1.18 | 10.00 | 1.53 |

Analisando os valores da tabela 4, é possível concluir que apesar de em algumas horas verificarem-se valores relativamente diferentes, a tendência dos valores de vibração quando aumenta ou desce, ocorre nas duas tipologias de medição. De referir que para efeito de análise, o *WEG Motor Scan* fornece o valor maior medido durante um determinado período de tempo, neste caso, de 6 em 6 horas. É de destacar, contudo, que a leitura efetuada pelo sensor tende a ser mais rigorosa na medida em que não há interferência humana (eliminando a possibilidade de erro na medição ou na própria leitura) e também devido ao facto de o sensor encontrar-se fixo, enquanto no caso das medições efetuadas pelos colaboradores afetos ao departamento de manutenção está-se sujeito a essa variabilidade. De referir que apesar do sensor estar em funcionamento entre o dia 29-03-2019 até 13-04-2019, só foi possível fazer a comparação dos valores de vibração entre 01-04-2019 e 05-04-2019, devido a não ter sido possível ter acesso aos valores obtidos pelo departamento de manutenção fora desse período.

Em relação à contra medida proposta apresentou resultados positivos na medida em que possibilitou a mudança do paradigma no seio da organização em estudo no que diz

respeito a como deverá ser efetuada a manutenção ao motor CR4. A implementação de um sistema de monitorização contínuo de vibração no motor da CR4 possibilitou a mudança da adoção de manutenção corretiva (atitude reativa) para uma política de manutenção baseada na condição do equipamento (atitude proativa) e eliminou a necessidade de deslocação de elementos do departamento de manutenção para a realização de medições de vibração, eliminando também os possíveis erros por eles realizados. Desta forma, o departamento de manutenção tem a possibilidade de efetuar a sua função de uma forma mais eficiente, uma vez que através da virtualização da condição do motor pode efetuar a sua monitorização e agir sobre o mesmo caso tal seja necessário.

Uma vez que a manutenção é feita baseada na condição do equipamento, é expectável que o OEE do mesmo aumente, uma vez que dois dos indicadores irão necessariamente subir: a disponibilidade irá aumentar uma vez que o *Muda* de equipamento parado irá diminuir e a performance também irá aumentar, uma vez que irão ser eliminadas perdas de rendimento através de intervenções de carácter preventivo.

Para além disso, a monitorização deste equipamento e do seu funcionamento, irá permitir a realização de manutenção planeada através de uma relação de cooperação entre o departamento de produção e de manutenção, o que no caso de fábricas de produção contínua, como é o caso, é crucial para os resultados da organização [30]. Assim sendo, esta melhoria proposta possibilita a integração de vários pilares da manutenção TPM, quer a manutenção planeada referida anteriormente, como a qualidade e a segurança [30].

4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O objetivo primordial do trabalho foi analisar em que medida podia-se estabelecer uma relação de cooperação e interligação entre a metodologia de melhoria contínua *Kaizen*, a metodologia de eliminação de desperdícios *Lean* e a Indústria 4.0, tendo como objetivo potenciar os resultados de manutenção, sendo que o mesmo foi alcançado.

No caso prático que foi desenvolvido, foi adotada a metodologia *Kaizen-Lean* e uma das ferramentas de análise e resolução de problemas, neste caso a ferramenta 3C. O objetivo deste trabalho era aumentar a fiabilidade do motor CR4 devido ao seu elevado nível de criticidade para o sistema. Para isso foi implementada uma contramedida suportada pela Indústria 4.0, neste caso a implementação de um sensor de monitorização contínua dos

valores de vibração do motor. O controlo e a análise dos dados de vibração do motor da CR4 possibilitaram ao departamento de manutenção monitorizar em tempo real o estado de funcionamento deste motor - virtualização *on time* -, levando a uma mudança no paradigma de como a manutenção é efetuada no mesmo; anteriormente, a manutenção deste equipamento era efetuada com um carácter corretivo, atualmente a mesma é efetuada através da manutenção preditiva baseada na condição. A adoção desta nova política de manutenção aumentou a fiabilidade deste sistema, assim como o índice de disponibilidade, uma vez que a manutenção do mesmo passou a ser planeada através do estabelecimento de comunicação entre o departamento de manutenção e produção, por forma a reduzir ao máximo o impacto da intervenção da manutenção, assim como reduzir ao máximo a taxa de falhas do motor. Para além do aumento da disponibilidade, é expectável o aumento do indicador de performance do mesmo, uma vez que a manutenção preditiva baseada na condição permitirá ao motor da CR4 trabalhar nas melhores condições durante mais tempo. O aumento dos indicadores de performance e disponibilidade, levará conseqüentemente ao aumento do OEE deste equipamento, que é um dos objetivos primordiais da manutenção, levando ao aumento da eficiência produtiva.

Simultaneamente foi possível eliminar *mudas* como as deslocações de elementos do departamento de manutenção para realizar medições dos valores de vibração, os possíveis erros ou variações de leitura efetuados pelos mesmos, custos de manutenção corretiva, paragem do equipamento, desperdício energético fruto do incorreto funcionamento do motor, manutenção excessiva através do recurso sistemático de manutenção de carácter corretivo, colaboradores de produção parados devido à ocorrência de ações de manutenção corretiva não planeadas [28].

Assim sendo, esta melhoria proposta possibilita a integração de vários pilares da manutenção TPM, quer a manutenção planeada referida anteriormente, como a qualidade e a segurança [30].

A maior dificuldade o trabalho foi a obtenção de dados do departamento de manutenção, por forma a ser possível comparar o cenário antes da implementação da contramedida e o após, impossibilitando desta forma o cálculo do OEE, que seria crucial para a validação

da contramedida. No entanto, foi possível comprovar o mesmo de uma forma empírica, uma vez que durante o tempo de monitorização do sensor, não se verificaram necessidades paragens do equipamento durante o tempo previsto para a produção, através da adoção da política de manutenção planeada.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Como possível trabalho futuro, através da monitorização contínua do motor, poderia ser monitorizado também de uma forma contínua o OEE, de forma a analisar continuamente o seu funcionamento, assim como a eficiência das melhorias implementadas.

Com base nos valores obtidos pela monitorização do motor, poderia dar-se um passo mais à frente da forma como a manutenção é executada, propondo desta forma a adoção da RCM. Para isso, teriam de ser feitos estudos e modelos estatísticos da distribuição de falha, de forma a avaliar o modelo a que o motor mais se adequa e parametrizá-lo conforme as suas especificidades. Tal iria dar um passo mais à frente na melhoria contínua de processos, levando a que o impacto da manutenção seja cada vez mais reduzido, o que é significativo para as organizações, dado que apesar de ser uma atividade crucial, não agrega valor ao produto final. Para além disso, a previsão do MTTF, poderia permitir ao departamento de compras, tornar mais eficiente o processo de compra de materiais necessários para intervenções de manutenção, garantindo que o mesmo está disponível JIT quando se prevê que o equipamento poderá apresentar falhas.

Aproveitando ainda a virtualização e a operação em tempo real do comportamento do motor, poderia ser criado um mecanismo de segurança responsável por sempre que o limite crítico fosse atingindo, o sistema fosse desligado de forma automática, assegurando desta forma a sua não destruição.

Por último, é proposta a criação de centros de formação de realidade aumentada, tal como descrito anteriormente no caso desenvolvimento pela Siemens, por forma a tornar os operadores cada vez mais capacitados, autónomos, eficientes e seguros. Este centro de formação poderia simular as intervenções que desenvolvem em chão de fábrica,

permitindo a que quando os mesmo fossem designados para uma operação real, estivessem mais preparados.

Referências Documentais

- [1] ANDERL, R. - Industrie 4.0 – technological approaches, use cases, and implementation, Automatisierungstechnik, 2015.
- [2] BICHENO, J. - The Lean Toolbox for Service Systems, Lean Enterprise Research Center, PICSIE Books, Cardiff Business School, England, 2006.
- [3] BORLIDO, D. – Indústria 4.0 – Aplicação a Sistemas de Manutenção, Portugal, 2017.
- [4] BOSTON, C. - Pillars of Technological Advancement, 2015.
- [5] BRAJYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. – Race Against The Machine, Estados Unidos da América, Digital Frontier Press, 2011.
- [6] BRIALES, J. - Melhoria Contínua através do Kaizen: Estudo de caso Daimler Chrysler do Brasil. Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão) Programa de Mestrado em Sistema de Gestão pela Qualidade Total. Universidade Federal Fluminense, 2005.
- [7] British Standards Institution - Maintenance – Maintenance Terminology, Inglaterra, 2010.
- [8] BRUNT, D.; BUTTHERWORTH, C - Waste elimination in lean production – A supply chain perspective, Alemanha, Proc ISATA, 1998.
- [9] CABRAL, J. - Organização e Gestão da Manutenção - dos conceitos à prática. Volume 6, 2006.
- [10] Casestudies -Siemens: Uso de realidade aumentada reduz tempo de execução de processos, 2019.
- [11] CHALICE, R. - Improving Healthcare using Toyota Lean Production Methods- 46 Steps for Improvement. Volume 2, ASQ Quality Press, 2007.
- [12] COIMBRA, E. - Kaizen in Logistics & Supply Chains, McGraw, 2013.
- [13] CRESPO, M., - Contemporary maintenance management: process, framework and supporting pillars. Volume 34, The International Journal of Management Science, 2006.
- [14] EDIMU, M.; GAUNT, C.; HERMAN, R. - Using probability distribution functions in reliability analyses, Volume 11, Electric Power Systems Research, 2011.
- [15] EUROPEAN PARLIAMENT, - Industry 4.0 Digitalization for productivity and growth, 2016.
- [16] Exame - <https://exame.abril.com.br/negocios/fabricante-de-moveis-da-via-varejo-bartira-amplia-portfolio/>, 2018.

- [17] FERNANDES, F. – Testes de ajuste a distribuições estatísticas e métodos para estimação dos parâmetros em análises de fiabilidade, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- [18] FORE, S.; MSIPHA, A. - Preventive Maintenance using Reliability Centred Maintenance (RCM): A case study of a ferrochrome manufacturing company, Volume 21, South African Journal of Industrial Engineering, 2010.
- [19] GOMES, P. – A evolução do conceito de qualidade – dos bens manufacturados aos serviços de informação, 2004.
- [20] HANSEN, R. - Overall equipment effectiveness: a powerful production/maintenance tool for increased profits, Industrial Press Inc, 2001.
- [21] HIGGINS, L. - Maintenance Engineering – Handbook, Volume 5, Estados Unidos da América, McGraw-Hill, 1995.
- [22] HINES, P. - The Principles of the Lean Business System Hines, S.A. Partners, 2010.
- [23] HOLMES, P. - Total quality management. British Medical Journal, 307(6918), 1993.
- [24] IMAI, M. - Kaizen - The Key to Japan’s Competitive Success, McGraw Hill, 1986.
- [25] IMAI, M. - Kaizen: A Estratégia para o Sucesso Competitivo; tradução Cecília Fagnani Lucca. 3ª ed. IMAM, 1990.
- [26] IMAI, M. - Gemba Kaizen a common sense, low-cost approach to management, McGraw Hill, 1986.
- [27] IMAI, M. - Kaizen: A Estratégia para o Sucesso Competitivo, 51ªed, Instituto Imam São Paulo, 1994.
- [28] IMAI, M - Gemba Kaizen: A Commonsense, Low Cost Approach to Management, Estados Unidos da América, McGraw Hill, 1997.
- [29] INSTITUTE, K. – Introdução aos 5s e KMS – Kaizen Management System, 2010.
- [30] INSTITUTE, K. - Kaizen Foundations, Portugal, 2015.
- [31] I-SCOOP – What is the Industrial Internet of Things (IIOT)?; <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/industrial-internet-things-iiot-saving-costs-innovation/industrial-internet-things-iiot/>, 2015.
- [32] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. - Recommendations for implementing the strategic initiative industry 4.0: final report of the industry 4.0 working group; 2013.
- [33] KHAN, A.; TUROWSKI, K. - Perspective on industry 4.0: from challenges to opportunities in production systems, International conference on internet of things and big data, 2016.
- [34] Lean Valley Glossario Muda-Mura-Muri. Obtido de <http://leanvalley.eu/2010/03/986-glossario-muda-muri-mura/>, 2010.

- [35] LEDERER, P. - Lead Time Performance measurement, Simon School of Business Working Paper, 1996.
- [36] LEE, J.; BAGHERI, K. - A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing Systems, 2015.
- [37] LIANG, K.; ZHANG Q. - Study on the Organizational Structured Problem Solving on Total Quality Management. International Journal of Business and Management, Volume 5, 2010.
- [38] LIKER, J. - O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo, Brasil, Bookman, 2005.
- [39] MARQUES, P. – Implementação de um sistema de manutenção preventiva, Universidade de Aveiro, 2009.
- [40] MELO, H. – Plano de manutenção preditiva para motores elétricos – Definição e implementação numa indústria de pasta de papel, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2017.
- [41] MELTON, T. - The benefits of Lean Manufacturing: What Lean Thinking has to Offer the Process Industries, Volume 83, Chemical Engineering Research and Design, 2005.
- [42] MESQUITA, A. - Ferramentas de Desenvolvimento e Aplicação do Lean Thinking no STV, Portugal, 2012.
- [43] MOBLEY, R. - An Introduction to Predictive Maintenance, Volume 2, Alemanha, 2002.
- [44] MOREIRA, S. - Aplicação das Ferramentas Lean: Caso de Estudo – Tese Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [45] MOURA, C. - Gestão da Manutenção, Brasil, 2009.
- [46] MURTHY, D.; ASGHARIZADEH, E. - Optimal decision making in a maintenance service operation, Volume 116, European Journal of Operational Research, 1999.
- [47] MURUGAN, N. - Implementing Kobetsu Kaizen Steps in a Manufacturing Company Goodway Rubber Industries, 2005.
- [48] NAKASATO, K. - Segundo Curso de Formação de Instrutores de TPM. XV Evento Internacional de TPM. I.M.C Internacional Sistemas Educativos, 1994.
- [49] OHNO, T. - Workplace Management, Inglaterra, Productivity Press, 1988.
- [50] OLIVEIRA, A.; COUTINHO, H. – Trabalho padronizado: a busca por eliminação de desperdícios, Brasil, 2008.
- [51] ORTIZ, C. - Kaizen Assembly: Designing, Constructing, and Managing a Lean Assembly Line. Estado Unidos da América, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [52] PEREIRA, F.; SENA, F. - Fiabilidade e a sua aplicação à Manutenção, Portugal, Publindústria, Edições Técnicas, 2012.

- [53] PINTO, J. - Pensamento Lean: A filosofia das organizações vencedoras, Portugal, Lidel, 2014.
- [54] Portal ERP – Os seis princípios da Indústria 4.0, <https://portalerp.com/os-6-principios-da-industria-4-0>, 2017.
- [55] PROTZMAN, C. - The Lean Practitioner's Field Book: Proven, Profitable and Powerful Techniques for Making Lean Really Work, Estados Unidos da América, CRC Press-Taylor & Francis Group, 2016.
- [56] RIBEIRO, H. - Total Productive Maintenance – Manutenção Produtiva Total, 2007.
- [57] ROCHA, L.; COLTRO, J.; TAKASHI, A.; GUERREIRO, K.; SHIBUYA, T. - Gestão da qualidade através da metodologia QRQC – Estudo de caso de uma empresa do setor automotivo, Volume 6, Revista Qualidade Emergente, 2015.
- [58] ROLDÃO, V.; RIBEIRO, J. – Gestão das Operações - Uma Abordagem Integrada ISBN 978-972-9413-73-5, 2007.
- [59] ROTHER, M.; SHOOK, J. – Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda, Lean Enterprise Institute, 1999.
- [60] ROTHER, M.;SHOOK,J. - Aprendendo a Enxergar, Lean Institute Brasil, 2003.
- [61] SCHMIDT, R.; MÖHRING, M.; HÄRTING, R.; REICHSTEIN, C.; NEUMAIER, P.; JOZINOVIĆ, P. - Industry 4.0- potentials for creating smart products: empirical research results, Polónia, Springer International Publishing, 2015.
- [62] SCHWAB, K. - The Fourth Industrial Revolution, World Economic Forum, 2016.
- [63] SEELIGER, B.; AWALEAONKAR K.; LAMPIRIS C. - So You Want to Get Lean, Mercer Management Journal, 2002.
- [64] Ser marceneiro é... - <https://recmoveis.wordpress.com/2015/03/19/ser-marceneiro-e/>, 2015.
- [65] SHAH, R., WARD, P. - Defining and developing measures of Lean production, Volume 27, Journal of Operations Management, 2007.
- [66] SHINGO, S. - A revolution in manufacturing: the SMED system. Productivity Press, 1985.
- [67] SICK - Interconexão e digitalização na fábrica interconectada do futuro, <https://www.sick.com/br/pt/interconexao-e-digitalizacao-da-producao/w/industry40-connectivity/>, 2018.
- [68] SIMÕES, A; COSTA, C; FILHO, H. - Processo de Melhoria Contínua: Estudo de Caso em um Célula de Montagem de Chave de Velocidade, Abepro, Brasil, 2006.
- [69] SINGH, J.; Singh, H. - Continuous improvement approach: state-of-art review and future implications. International Journal of Lean Six Sigma, Vol. 3, Nº 2, 2012.
- [70] SONDALINI, M. - Understanding How to Use the 5-Whys for Root Cause Analysis - Lifetime Reliability Solutions, 2011.

- [71] SOUMYA, R.; PUROHIT, V. - Implementation of 5S Methodology in a Manufacturing Industry, Volume 6, International Journal of Scientific & Engineering Research, 2015.
- [72] SOUZA, V. - Organização e gerenciamento da manutenção, Volume 4, Brasil, All Print Editora, 2011.
- [73] STAMIS, D. - The OEE Primer: Understanding Overall Equipment Effectiveness, Reliability, and Maintainability. CRC Press, 2010.
- [74] SYNCHRONO - Gaining Control: Exploring Push & Pull Manufacturing. <http://www.synchrono.com/wp-content/uploads/2013/07/2013-Push-v-Pull-Manufacturing-WhitePaper.pdf>, 2013.
- [75] THOMAZ, M. - Balanced ScoreCard e Hoshin Kanri: Alinhamento Organizacional e Execução da Estratégia, Portugal, Biblioteca Lean, 2015
- [76] VANTI, N. - Ambiente de Qualidade em uma Biblioteca Universitária: Aplicação do 5S e de um Estilo Participativo de Administração, 1999.
- [77] WADHWA, R. - Flexibility in manufacturing automation: a living lab case study of Norwegian metalcasting SMEs, Volume 31, Noruega, Journal of Manufacturing Systems, 2012.
- [78] WANG, S; WAN, J.; LI, D.; ZHANG, C. – Implementing smart factory of Industry 4.0: an outlook, China, School of Mechanical and Automotive Engineering, 2015.
- [79] WATSON, M. – The Deming Management Method, Perigee Books, 1986.
- [80] WEG, <https://www.weg.net/wegmotorscan/pt>, 2019.
- [81] WEG Motor Scan – Manual geral de instalação e operação, <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0b/h4b/WEG-weg-motor-scan-manual-geral-de-instalacao-e-operacao-14603136-manual-english-portuguese-spanish-web.pdf>, 2019
- [82] WEIGEL, A. - A Book Review: Lean Thinking by Womack and Jones, Productivity and Quality Publishing, 2000.
- [83] WOMACK, J. - A máquina que mudou o mundo, Brasil, 1992.
- [84] WOMACK, J.; P. JONES, D. - Lean Thinking, Estados Unidos da América, Journal Free Press, 2003.
- [85] ZUASHKIANI, A.; RAHMANDAD, H.; JARDINE, A. - Mapping the Dynamics of Overall Equipment Effectiveness to Enhance Asset Management Practices, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2011.

Anexo A. Valores de vibração radial X medidos pelo WEG Motor Scan

| DEVICEID | OCCURREDAT | RADIALVIBRATION x (mm/s (rms)) |
|--------------|------------------------|--------------------------------|
| d499b02000c0 | 2019-03-29 11:59:00 | 3,4445438 |
| d499b02000c0 | 2019-03-29 12:19:00 | 0,24933371 |
| d499b02000c0 | 2019-03-29 12:54:00 | 0,2075169 |
| d499b02000c0 | 2019-03-29 16:00:00 | 2,4487822 |
| d499b02000c0 | 2019-03-29 22:00:00 | 3,3622732 |
| d499b02000c0 | 2019-03-30 04:00:00 | 5,33879 |
| d499b02000c0 | 2019-03-30 10:00:00 | 5,6369395 |
| d499b02000c0 | 2019-03-30 16:00:00 | 5,66296 |
| d499b02000c0 | 2019-03-30 22:00:00 | 4,2263436 |
| d499b02000c0 | 2019-03-31 04:00:00 | 5,67346 |
| d499b02000c0 | 2019-03-31 10:00:00 | 5,9171057 |
| d499b02000c0 | 2019-03-31 16:00:00 | 5,766985 |
| d499b02000c0 | 2019-03-31 22:00:00 | 5,645853 |
| d499b02000c0 | 2019-04-01 04:00:00 | 6,121781 |
| d499b02000c0 | 2019-04-01 10:00:00 | 5,574991 |
| d499b02000c0 | 2019-04-01 16:00:00 | 6,273125 |
| d499b02000c0 | 2019-04-01 22:00:00 | 5,957286 |
| d499b02000c0 | 2019-04-02 04:00:00 | 6,1438336 |
| d499b02000c0 | 2019-04-02 10:00:00 | 7,317111 |
| d499b02000c0 | 2019-04-02 16:00:00 | 10,753178 |
| d499b02000c0 | 2019-04-02 22:00:00 | 3,3906736 |

| | | |
|--------------|------------------------|------------|
| d499b02000c0 | 2019-04-03 04:00:00 | 7,216854 |
| d499b02000c0 | 2019-04-03 10:00:00 | 0,26518005 |
| d499b02000c0 | 2019-04-03 16:00:00 | 1,4470141 |
| d499b02000c0 | 2019-04-03 22:00:00 | 1,0394429 |
| d499b02000c0 | 2019-04-04 04:00:00 | 2,2587788 |
| d499b02000c0 | 2019-04-04 10:00:00 | 1,1046098 |
| d499b02000c0 | 2019-04-04 16:00:00 | 1,2051787 |
| d499b02000c0 | 2019-04-04 22:00:00 | 1,1501254 |
| d499b02000c0 | 2019-04-05 04:00:00 | 1,1821791 |
| d499b02000c0 | 2019-04-05 10:00:00 | 1,5308561 |
| d499b02000c0 | 2019-04-05 14:53:00 | 1,3756733 |
| d499b02000c0 | 2019-04-05 16:00:00 | 1,6860839 |
| d499b02000c0 | 2019-04-05 22:00:00 | 1,4848739 |
| d499b02000c0 | 2019-04-06 04:00:00 | 1,5063149 |
| d499b02000c0 | 2019-04-06 10:00:00 | 1,3608785 |
| d499b02000c0 | 2019-04-06 16:00:00 | 1,4181776 |
| d499b02000c0 | 2019-04-06 22:00:00 | 1,3521473 |
| d499b02000c0 | 2019-04-07 04:00:00 | 1,1757501 |
| d499b02000c0 | 2019-04-07 10:00:00 | 1,3959546 |
| d499b02000c0 | 2019-04-07 16:00:00 | 1,6391782 |
| d499b02000c0 | 2019-04-07 22:00:00 | 1,4290285 |
| d499b02000c0 | 2019-04-08 04:00:00 | 1,3173294 |
| d499b02000c0 | 2019-04-08 10:00:00 | 1,2971379 |
| d499b02000c0 | 2019-04-08 16:00:00 | 1,3424655 |
| d499b02000c0 | 2019-04-08 17:22:00 | 1,1053791 |
| d499b02000c0 | 2019-04-08 | 1,094724 |

| | | |
|--------------|------------------------|------------|
| | 22:00:00 | |
| d499b02000c0 | 2019-04-09 04:00:00 | 1,1489393 |
| d499b02000c0 | 2019-04-09 10:00:00 | 0,9834715 |
| d499b02000c0 | 2019-04-09 16:00:00 | 1,4055121 |
| d499b02000c0 | 2019-04-09 22:00:00 | 1,0964081 |
| d499b02000c0 | 2019-04-10 04:00:00 | 1,2746767 |
| d499b02000c0 | 2019-04-10 10:00:00 | 1,2171367 |
| d499b02000c0 | 2019-04-10 16:00:00 | 1,3736955 |
| d499b02000c0 | 2019-04-10 22:00:00 | 1,1557728 |
| d499b02000c0 | 2019-04-11 04:00:00 | 1,1815459 |
| d499b02000c0 | 2019-04-11 10:00:00 | 1,1996194 |
| d499b02000c0 | 2019-04-11 16:00:00 | 1,0207294 |
| d499b02000c0 | 2019-04-11 22:00:00 | 1,1856053 |
| d499b02000c0 | 2019-04-12 04:00:00 | 1,0572071 |
| d499b02000c0 | 2019-04-12 10:00:00 | 0,95905834 |
| d499b02000c0 | 2019-04-12 10:21:00 | 1,3245223 |
| d499b02000c0 | 2019-04-12 10:22:00 | 1,1408799 |
| d499b02000c0 | 2019-04-12 10:24:00 | 1,0266148 |
| d499b02000c0 | 2019-04-12 16:00:00 | 1,4386948 |
| d499b02000c0 | 2019-04-12 22:00:00 | 1,4274495 |
| d499b02000c0 | 2019-04-13 04:00:00 | 1,7860194 |
| d499b02000c0 | 2019-04-13 10:00:00 | 1,237025 |
| d499b02000c0 | 2019-04-13 16:00:00 | 1,3835897 |

