

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM SISTEMAS  
PRODUTIVOS

ROSANGELA OLIVEIRA SOUZA

UM FRAMEWORK PARA INTEGRAÇÃO DO *MANUFACTURING EXECUTION  
SYSTEM* – MES E DO *TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE* – TPM NO AMBIENTE  
DA INDÚSTRIA 4.0

São Paulo, agosto de 2022

ROSANGELA OLIVEIRA SOUZA

UM FRAMEWORK PARA INTEGRAÇÃO DO *MANUFACTURING EXECUTION  
SYSTEM* – MES E DO *TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE* – TPM NO AMBIENTE  
DA INDÚSTRIA 4.0

Projeto de Dissertação apresentado como exigência parcial para o Exame de Qualificação no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, sob a orientação do Prof. Dr. António César Galhardi

São Paulo, agosto de 2022

Souza, Rosangela Oliveira

S729f Um framework para integração do manufacturing execution system – mes e do total productive maintenance – tpm no ambiente da industria 4.0 / Rosangela Oliveira Souza. – São Paulo: CPS, 2022.  
82 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. António César Galhardi

Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2022.

1. Sistema de execução da manufatura. 2. Manutenção produtiva total. 3. Industria 4.0. I. Galhardi, António César. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

ROSANGELA OLIVEIRA SOUZA

UM FRAMEWORK PARA INTEGRAÇÃO DO *MANUFACTURING EXECUTION  
SYSTEM* – MES E DO *TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE* – TPM NO AMBIENTE  
DA INDÚSTRIA 4.0

---

Prof. Dr. António César Galhardi

---

Prof. Profa. Dra. Ana Grazielle Lourenço Toledo

---

Prof. Dr. José Manoel Souza das Neves

São Paulo, agosto de 2022

“Se vi mais longe foi por estar sobre os ombros  
de gigantes”.

(Isaac Newton)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço este trabalho primeiramente a Deus, por ter me concedido a vida, sabedoria e resiliência para enfrentar os momentos de fraqueza e seguir em frente.

Agradeço a minha amada filha Anna Clara e ao meu amado companheiro Luís Carlos por toda paciência e motivação, mas principalmente pela compreensão quando me fiz ausente para dedicar-me a este trabalho.

Agradeço imensamente aos meus pais, irmãos e toda minha família e amigos por estarem sempre presente compartilhando das alegrias e das dificuldades e a todos que de alguma forma incentivaram o meu crescimento.

Ao meu orientador Prof. Dr. António César Galhardi pelo incentivo, paciência e principalmente por compartilhar seu conhecimento. Sua dedicação foi fundamental para a conclusão deste projeto e para o meu desenvolvimento.

Agradeço a todos os funcionários e Professores da Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza que contribuíram para realização dos meus objetivos.

Aos meus colegas de turma que por diversas vezes me apoiaram, escutaram e compartilharam seus conhecimentos e aflições de eternos aprendizes que somos.

## RESUMO

SOUZA, R. O. Um *Framework* para Integração do *Manufacturing Execution System* – MES e do *Total Productive Maintenance* – TPM no Ambiente da Indústria 4.0. 82 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Desenvolvimento da Educação Profissional). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2022.

O presente trabalho tem por objetivo mostrar por meio de um *framework*, a integração dos Sistemas de Execução da Manufatura – MES e da Manutenção Produtiva Total – TPM, no ambiente da Indústria 4.0, bem como justificar a importância deles para a tomada de decisões rápidas e eficientes, e auxiliar no gerenciamento dos equipamentos. A transição para tais tecnologias se torna um passo decisivo para a competitividade, cuja interação entre o virtual e o real, os chamados sistemas *cyber*-físicos dos sistemas produtivos é caminho obrigatório para quem busca, além da digitalização, uma gestão eficiente, capaz de atender aos negócios estratégicos da organização. Assim, os Sistemas de Execução da Manufatura – MES surge como uma solução para o gerenciamento e monitoramento das operações no chão de fábrica, a base da manufatura inteligente. A indústria 4.0 e suas transformações não irão apenas extinguir muitos postos de trabalho, mas também criar funções e cargos em diversos outros segmentos à medida em que a automação se torna mais comum nas organizações, e a manutenção assume cada vez mais uma função importante nas empresas de manufatura. Assim, a Manutenção Produtiva Total – TPM é vista como alicerce para otimizar a manutenção inteligente e atingir um estado de alta eficiência. Os resultados obtidos neste estudo demonstram que com o *framework* proposto permite a avaliação da segurança da manutenção e da implantação da Indústria 4.0 de forma mais ágil, além de proporcionar uma visão geral de todas as áreas do negócio e seus respectivos níveis de maturidade.

**Palavras-chave:** Sistema de Execução da Manufatura. Manutenção Produtiva Total. Indústria 4.0.

## ABSTRACT

**SOUZA, R. O. A Framework for Integration of the Manufacturing Execution System – MES and Total Productive Maintenance – TPM in the Industry 4.0 Environment.** 82 f. Dissertation (Professional master's in management and Development of Professional Education). Paula Souza State Technological Education Center, São Paulo, 2022.

The present work aims to show, through a framework, the integration of Manufacturing Execution Systems - MES and Total Productive Maintenance - TPM, in the Industry 4.0 environment, as well as justifying their importance for quick and efficient decision making efficient, and assist in equipment management. The transition to such technologies becomes a decisive step towards competitiveness, whose interaction between the virtual and the real, the so-called cyber-physical systems of productive systems, is a mandatory path for those who seek, in addition to digitalization, an efficient management, capable of meeting to the organization's strategic business. Thus, the Manufacturing Execution Systems - MES emerges as a solution for the management and monitoring of operations on the factory floor, the basis of intelligent manufacturing. Industry 4.0 and its transformations will not only extinguish many jobs, but also create roles and positions in several other segments as automation becomes more common in organizations, and maintenance increasingly assumes an important role in companies. of manufacturing. Thus, Total Productive Maintenance – TPM is seen as a foundation for optimizing intelligent maintenance and achieving a state of high efficiency. The results obtained in this study demonstrate that with the proposed framework, it allows the assessment of maintenance security and the implementation of Industry 4.0 in a more agile way, in addition to providing an overview of all areas of the business and their respective levels of maturity.

**Keywords:** Manufacturing Execution System. Total Productive Maintenance. Industry 4.0.

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Modelo das principais tecnologias que podem afetar os pilares do TPM .....	44
Quadro 02: Seleção – Relevância e Aderência.....	59
Quadro 03: Heurística de Implantação do Pilar de Manutenção Autônoma, suportado pelo MES.....	61
Quadro 04: Proposta de Modelo de Maturidade na Metodologia TPM .....	68

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 01: Modelo Funcional MES .....	27
Figura 02: Integração horizontal e vertical do MES.....	28
Figura 03: Mapa Mental MES - Funcionalidades e Integração com TPM.....	29
Figura 04: Mapa Mental TPM – Visão e Objetivos .....	31
Figura 05: Etapas de Implantação do TPM .....	33
Figura 06: Os Sete Passos da Manutenção Autônoma .....	40
Figura 07: Método de Pesquisa Proposto por Peffers .....	54
Figura 08: Palavra-chave ‘ <i>Manufacturing Execution System</i> ’ .....	56
Figura 09: Palavra-chave ‘ <i>Total Productive Maintenance</i> ’ .....	56
Figura 10: Palavra-chave ‘ <i>Industry 4.0</i> ’ .....	57
Figura 11: Palavras-chave ‘ <i>Total Productive Maintenance</i> ’ ‘AND’ ‘ <i>Industry 4.0</i> ’ .....	57
Figura 12: Palavras-chaves ‘ <i>Manufacturing Execution System</i> ’ AND ‘ <i>Industry 4.0</i> ’ .....	58

## LISTA DE SIGLAS

CPS	Cyber-Physical Systems
CPM	Collaborative Production Management
CPPS	Cyber-Physical Production Systems
DSR	Design Science Research
ECRS	Eliminar, combinar, reorganizar ou simplificar
ERP	Enterprise Resource Planning
I4.0	Industry 4.0
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
KPI	Key Performance Indicator
MES	Manufacturing Execution System
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Association
MRP	Manufacturing Resource Planning
MTTR	Mean time to repair
MTBF	Mean time between failures
OEE	Overall Equipment Effectiveness
TI	Information Technology
TPM	Total Productive Maintenance
TPS	Toyota Production System
TQM	Total Quality Management

## SUMÁRIO

<b>1- INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1- Justificativa.....	17
1.2- Questão de Pesquisa .....	17
1.3- Objetivo Geral .....	20
1.4- Objetivos Específicos .....	20
<b>2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>24</b>
2.1- Sistemas de Execução da Manufatura – MES.....	24
2.2- Manutenção Produtiva total – TPM .....	29
2.3- Implementação .....	31
2.4- KPI's TPM .....	35
2.5- Pilares TPM .....	37
2.6- Manutenção Autônoma .....	39
2.7- Indústria 4.0.....	41
2.7.1 Evolução da Indústria .....	42
2.7.2 Facilitadores da Indústria 4.0 .....	43
<b>3- METODOLOGIA .....</b>	<b>52</b>
<b>4- CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>71</b>
<b>5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A velocidade dos avanços tecnológicos atuais não tem precedentes históricos quando comparados com as revoluções industriais anteriores. A chamada indústria 4.0 ou Quarta Revolução Industrial, está evoluindo em um ritmo exponencial, assim a fábrica do futuro utiliza sistematicamente novos desenvolvimentos em Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), pois mesmo antes do processo de produção real, a fábrica é virtualmente mapeada da forma mais holística e fiel aos detalhes possível. Nesse sentido, os autores Meyer, Fuchs e Thiel explicam que, “com as TIC, o processo de produção ideal para o produto é desenvolvido de forma interativa por meio da simulação do processo de produção, incluindo o fluxo de material e troca de informações em tempo real” (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009, p. 16).

Isso é importante porque, segundo afirmam Dresch, *et al* (2019, p. 69) “um ambiente dinâmico e competitivo motiva as empresas a buscarem alternativas que as ajudem a se prepararem para mudanças econômicas, sociais, políticas, tecnológicas e estruturais”. Nesse contexto, os autores Almeida e Fabro ressaltam que,

A busca para a escalabilidade dos processos é o maior desafio, para colocar tudo isso em prática é necessário que seja economicamente viável e uma vez que isso acontecer, a revolução estará feita. Geração de emprego e renda, soluções de problemas sérios como a escassez da água, fome e a poluição atmosférica estarão cada vez mais próximas (ALMEIDA; FABRO, 2019, p. 16).

Entende-se, então, que as informações de produção em tempo real são cruciais para a tomada de importantes decisões em negócios, e, sendo assim, um MES pode fornecer o suporte necessário para se ter uma tomada de decisão assertiva, baseada nas rápidas informações que ele gera, além das estatísticas armazenadas.

MES, segundo conceitua o autor Neves é,

[...] um sistema de informação de processo que, de forma ativa, coleta, processa e analisa materiais, produtos semiacabados e acabados, máquinas, tempos, custos etc., no local de produção, em tempo real e monitora o trabalho, enquanto este ocorre. O sistema MES funciona como uma central para distribuição de dados do chão de fábrica, para todos os outros sistemas da empresa (NEVES, 2011, p. 64).

Desta forma, a aplicação do TPM pode complementar esse auxílio na tomada de decisão, haja vista que o TPM, por sua vez, estabelece um sistema de manutenção baseado em confiabilidade de classe mundial, utilizando manutenção autônoma, manutenção preditiva, e manutenção preventiva que facilmente podem ser monitoradas pelo MES, ou seja, conforme

resumiu o autor Ribeiro, o TPM é “uma metodologia para a maximização da produtividade do processo produtivo por meio da eliminação de perdas nas áreas diretas e indiretas da empresa” (RIBEIRO, 2016, p. 14).

Todos esses dados compilados podem e devem ser utilizados por operadores e pela manutenção para sanar desvios e defeitos com maior agilidade, além da confiabilidade destas ações serem pautadas pelo conhecimento e habilidades adquiridas ao longo do tempo com a evolução do TPM.

Assim, as empresas têm buscado estratégias que permitam uma reação mais próxima às necessidades individuais dos clientes, além de melhoria da qualidade de seus produtos. E, ao mesmo tempo em que buscam o aumento da produtividade e redução dos custos a fim de que consigam enfrentar esses desafios que são constantes e diários, aponta-se que as organizações, atualmente, atingiram melhores resultados ao executarem as metodologias, como o TPM.

Nesse contexto, o autor Almada-Lobo (2015) entende que, estas metodologias ajudam na transição para a I4.0 e garantem o impacto no resultado financeiro por meio de melhoria na produtividade, qualidade e satisfação do cliente, juntamente com o MES, que têm sido fundamental no desempenho e agilidade necessária para os desafios criados pelos negócios de manufatura globalizados e muito provavelmente continuará a ser.

Isto posto, faz-se necessário conceituar o que significa a Indústria 4.0 ou a Quarta Revolução Industrial, pois ela engloba um amplo sistema de tecnologias avançadas usando inteligência artificial, robótica, *internet* das coisas e computação em nuvem, haja vista as mudanças nas formas de produção e os modelos de negócios no Brasil e no mundo.

Cabe realçar que, tanto o sistema de informação MES quanto a I4.0 são temas bastante contemporâneos e suscetíveis a contínuas mudanças, haja vista as constantes evoluções tecnológicas deste século XXI. O MES é uma ferramenta ligada aos sistemas de TI e evoluem rapidamente, sendo uma das ferramentas utilizadas pela I4.0 para mensurar o desempenho no chão de fábrica por meio de suas funcionalidades.

A I4.0 atua como uma justificada revolução industrial, visto que viabiliza a digitalização de processos em diferentes áreas e atividades e utiliza de conceitos de sistemas ciber-físicos, *internet* das coisas e computação em nuvem. O MES é responsável por controlar e direcionar a produção com base na aquisição de dados operacionais, de máquinas e de pessoal, servindo como um elo entre o sistema de controle da máquina e todos os níveis da empresa proporcionando boa parte da digitalização necessária.

As principais tarefas do MES estão no planejamento detalhado da produção e na coleta de dados que serão encaminhados ao sistema de planejamento de recursos empresariais

*Enterprise Resource Planning* (ERP) para planejamento futuro (SIEPMANN, 2016, p.16). O termo I4.0 também significa produção industrial em rede conectada à *internet* por meio dos limites da empresa. Isso é possível, principalmente, pela estreita ligação de sistemas de planejamento de recursos empresariais (ERP), sistemas de execução de fabricação (MES) e bancos de dados com informações em tempo real de fábricas, cadeias de suprimentos e de clientes e produtos. Os vários players precisam, portanto, de uma plataforma virtual que sirva de ‘*marketplace*’ para trocas rápidas, descomplicadas e, acima de tudo, seguras (KLEINEMEIER, 2014).

Acredita-se que o MES desempenha um papel central no caminho da empresa manufatura em direção à I4.0 e uma das consequências é a flexibilidade e transparência nos processos. A I4.0 é baseada em um conceito que tem despertado a atenção de muitas pessoas: uma fusão dos mundos físico e virtual, representada pelo *Cyber-Physical Systems* (CPS), pela *Internet of Things* (IoT) e *Internet of Services* (IoS). Ambos exercem coletivamente um impacto significativo em todos os aspectos de empresas de manufatura. A quarta revolução industrial, ao contrário de todas as outras, tem permitido que as empresas tomem ações específicas antes que elas aconteçam (ALMADA-LOBO, 2015).

A I4.0 também conhecida como a Quarta Revolução Industrial representa o desenvolvimento consistente das três revoluções industriais anteriores. Baseia-se em abordagens históricas e tecnológicas da fábrica inteligente e da produção integrada por computador (SIEPMANN, 2016). Assim, o suporte do MES, representado pelo planejamento fino da produção, análise de desempenho e pelo rastreamento de produtos, pode ajudar os fabricantes a serem mais eficientes e a ganhar mais competitividade no mercado global (CHEN; VOIGT, 2020).

Nesse sentido, compreende-se que a I4.0 é a atual revolução na indústria de manufatura que envolve a integração de sensores, máquinas de produção, conectividade sem fio e os conecta a uma plataforma de software que pode supervisionar todo o processo da linha de produção e executar as decisões de forma autônoma. Interconectividade e automação são os principais fatores da I4.0 e são necessários para implementar uma manufatura inteligente ambiente (RAO; *et al*, 2020).

O MES é uma solução da TI orientada a processos que coleta e gerencia informações acerca dos processos de fabricação de chão de fábrica (CHEN; NOPHUT; VOIGT, 2021, p. 2607). Preferencialmente, a análise deve ser realizada em tempo real, a fim de tomar decisões para controlar o processo com a rapidez necessária (D’ANTONIO; *et al*, 2017).

A I4.0 permitirá que as pessoas, como tomadores de decisão informados, convertam a riqueza de informações obtidas em processos otimizados de maneira direcionada e adequada à situação (JOCHEN; *et al*, 2014).

Seguindo este conceito, TPM ajuda a obter métricas, pois envolve a tecnologia e mão de obra para otimização de cada etapa do processo produtivo e ao introduzir a manutenção nas atividades diárias dos profissionais obtém-se grandes resultados nas paradas de máquinas e aumenta-se o intervalo entre as manutenções obrigatórias, otimizando, dessa forma, a produção, bem como se elimina os desperdícios, alcançando-se, assim, a máxima eficiência. TPM traz a manutenção em foco como um elemento necessário e parte vital para a indústria de manufatura.

A iniciativa TPM visa melhorar a competitividade das organizações e abrange uma estrutura de abordagem capaz de mudar a mentalidade dos funcionários, visto que fomenta uma mudança visível na cultura de trabalho de uma organização (AHUJA; KHAMBA, 2008).

A TPM foi descrita em 1988 por Seiichi Nakajima em seu livro ‘Introdução ao TPM - *Total Productive Maintenance*’, visando à integração de seus colaboradores por meio da troca de conhecimentos, para maximizar a eficiência e eficácia dos seus equipamentos, onde a integração tem grande potencial para auxiliar as empresas a atingirem suas metas de produtividade.

Existe uma série de iniciativas estratégicas em empresas de produção que visam executar a produção com a melhor relação custo-benefício possível. São principalmente o sistema de produção Toyota (TPS), a produção enxuta e as abordagens 6 Sigma. Um MES deve ser uma ferramenta de acompanhamento para a implementação dessas iniciativas (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009).

Isto posto, este estudo pretende destacar a conexão entre o MES, o TPM com a I4.0, pois essas evoluções são necessárias e as empresas devem realizar tarefas que abranjam todos os setores da produção, desde o processo de fabricação até a gestão de recursos materiais e humanos. Entende-se, então, conforme elucida o autor Borlido, que uma fábrica inteligente é aquela que trabalha na máxima eficiência, usando máquinas inteligentes que estão interligadas entre si, colaborando entre elas, os colaboradores, os fornecedores, os clientes, e com a cadeia analítica e dinâmica para permitir este autocontrole (BORLIDO, 2017).

## 1.1 Justificativa

Este trabalho justifica-se, sobretudo, baseado na experiência da autora com o tema escolhido. Durante 15 anos atuando na indústria de manufatura e aplicando a metodologia TPM, criou-se grande afinidade com o assunto, além de ter visto e aplicado às inúmeras e crescentes tecnologias da I4.0 no processo produtivo, inclusive a implementação do MES.

No entanto, após adentrar a este mestrado, foi percebido que no meio acadêmico há pouca informação, com base na pesquisa bibliométrica realizada, onde se teve poucos resultados que demonstrassem a ligação entre TPM e I4.0 ou TPM e MES, onde se tem a integração do MES enquanto uma ferramenta de controle e planejamento com a TPM, sendo esta última uma metodologia pioneira.

Assim, a proposta deste estudo é a de propor um *framework* e tem como principal objetivo resolver problemas recorrentes com uma abordagem genérica, construída a partir de uma união de outras definições de diversos autores de referência relacionados ao tema e sua estruturação baseada no quadro conceitual formado e a principal vantagem desta ferramenta é a economia de tempo e de segurança das informações.

## 1.2 Questão de Pesquisa

Este estudo terá como questão guia a ser desvelada a questão de como a integração entre MES, uma das tecnologias habilitadoras da I4.0 e TPM, uma metodologia pioneira, pode impactar positivamente na forma de obter melhorias processo produtivo.

Para responder à questão de pesquisa declarada neste trabalho, com base na literatura pesquisada, é visto que o pano de fundo do progresso tecnológico onde a gama de problemas e demandas para humanos no espaço da fábrica mudará. Máquinas, peças e componentes tornam-se cada vez mais autônomas e auto-organizadas, e, portanto, os cenários de manufatura ainda mais complexos se tornarão gerenciáveis, em contraste com a abordagem *Computer Integrated Manufacturing* (CIM) dos anos 80.

O movimento da I4.0 não está gravitando em direção às instalações de produção sem trabalhadores. Em vez disso, as pessoas devem ser integradas na estrutura física cibernética de tal forma que suas habilidades e talentos individuais podem ser plenamente realizados (GORECKY; *et al*, 2014).

Um dos princípios básicos do TPM é a melhoria dos equipamentos, por meio do conhecimento agregado aos participantes, sendo que os japoneses foram os primeiros a perceber

a importância de melhoria na manutenção de equipamentos para obtenção de vantagem competitiva no mercado (AHUJA; KHAMBA, 2008).

A união do TPM e do MES poderá auxiliar a tomada de decisões mais rápidas e eficientes e principalmente manter as melhorias realizadas para sanar os defeitos. Essa união trará maturidade para a empresa e seus colaboradores e otimizará todos os seus ativos, trazendo grande vantagem competitiva (SOUZA; NEVES, 2020, p. 921).

Os Sistemas de Execução de Manufatura têm sido fundamentais no desempenho, qualidade e agilidade necessários para os desafios criados pelos negócios de manufatura globalizados e provavelmente continuarão a ser (ALMADA-LOBO, 2015). A I4.0 visa melhorar a produtividade atendendo às crescentes demandas dos clientes por uma resposta mais rápida em tempo real por meio do controle de produção descentralizado. Essas expectativas podem ser atendidas pelo MES para melhorar o desempenho, a qualidade e a agilidade dos negócios de manufatura globalizados (RAO *et al*, 2020).

Pode-se ter como base de apoio que o MES pode ter diferentes grupos de usuários com interfaces e módulos personalizados para cada grupo. Por exemplo, o pessoal de gestão pode ter acesso ao monitor módulo de integração e pode ser capaz de calcular indicadores-chave de desempenho (KPIs), a partir dos dados adquiridos, enquanto os operadores da máquina podem ter acesso ao seu módulo de planejamento (MANTRAVADIA; MOLLER, 2019).

Por um lado, o MES orienta a execução de planos de produção bruta em operações detalhadas no chão de fábrica. Por outro lado, fornece à empresa o KPIs, permitindo decisões comerciais (CHEN; VOIGT, 2020). Os dados condensados oferecidos pelo MES como KPIs constituem uma ferramenta de gestão especialmente útil, esse objetivo pode ser alcançado por meio de números de desempenho adequados fornecidos pelo MES por turno de produção, os desvios não devem ser conhecidos apenas alguns dias depois, mas idealmente devem ser publicados on-line ou pelo menos por turno para os funcionários da produção (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009).

Entende-se que o MES é responsável por coletar os dados no chão de fábrica, analisá-los por meio de técnicas matemáticas adequadas e extrair as informações necessárias para fornecer uma imagem exata do estado atual do processo. Possivelmente a análise será realizada em tempo real, a fim de tomar decisões para controlar o processo com a rapidez necessária.

Diante deste histórico, o MES desempenha um papel estratégico no apoio à Indústria 4.0, sendo uma plataforma que permite a transformação dos dados coletados no chão de fábrica em informações que podem alimentar os modelos de simulação e por sua vez habilitar a digitalização da Manufatura (D'ANTONIO *et al*, 2017).

A I4.0 pode de fato ser descrita como a digitalização da indústria, pois com ela os processos de produção adquirirão capacidades de fabricação modulares e flexíveis que podem tomar decisões por conta própria, mas que também podem ser integradas com outras áreas de produção (ÖZTÜRK, 2017).

O foco das práticas de TPM envolve todo o ciclo de vida do equipamento, pois além do suporte da alta administração ser um diferenciador à chave para a TPM, é preciso haver aceitação em todos os níveis da organização. Portanto, a gestão executiva precisa trabalhar em correlação direta com a linha de frente, representada pelos supervisores com o gerenciamento intermediário e com as funções de suporte.

O TPM coordena todo o pessoal por meio da participação de práticas importantes, incluindo fornecedores, operadores, engenheiros e pessoal da manutenção. Ele também promove e efetiva as atividades baseadas em equipe em todos os níveis dentro da organização com o mesmo objetivo em mente de zero defeitos e zero avarias (KANTI; CUDNEY, 2018).

Considerando que o departamento de manutenção é o centro tradicional de programas de manutenção preventiva, o TPM envolve trabalhadores de todos os departamentos e níveis, incluindo o chão de fábrica e executivos seniores, cujo intuito é garantir a operação eficaz do equipamento (AHUJA; KHAMBA, 2008).

A base da maximização da produtividade proposta pelo TPM é a eliminação das perdas, principalmente em empresas fabris. Muitas vezes, as empresas investem em equipamentos mais modernos quando poderiam fazer uma melhor gestão de seus ativos, extraindo deles o máximo potencial a custos próximo do zero, uma vez que eles já devem ter sido depreciados (RIBEIRO, 2014).

A literatura identifica que o MES, por meio de suas funcionalidades, pode contribuir para mensurar a eficácia do TPM, como nos estudos realizados pelos autores Tortorella *et al* (2021), apesar de diferentes abordagens realizadas por cada empresa, por exemplo: sistemática, restrita ou sequencial, argumentos de todos os estudos de caso indicaram uma percepção positiva das eficiências da inovação em relação à integração das tecnologias I4.0 nas práticas de TPM.

Em outras palavras, essa integração resultou em melhorias desempenho da gestão de manutenção, mesmo em aplicações isoladas. Hoje, os modernos sistemas de execução de manufatura – MES, podem oferecer aplicações em tempo real. Eles geram mapas atuais e até históricos para equipamentos de produção e podem, assim, ser usados como base para processos de otimização (KLETTI, 2007).

### 1.3 Objetivo Geral

É sabido que os produtos da Design Science Research (DSR) são os artefatos, sendo assim, este estudo tem por objetivo propor um framework que integre o MES e TPM para otimizar os resultados em um ambiente de I4.0, bem como, seus níveis de maturidade.

### 1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos mencionados a seguir são validados com base na literatura pesquisada e revisada, visto que, não foram testados empiricamente pela autora, assim, visam sustentar o objetivo geral deste trabalho, ou seja, fornecer ao leitor uma visão geral sobre os conceitos do MES e como ele desempenha um papel fundamental nos sistemas de fabricação da I4.0, juntamente com os conceitos da TPM, com foco também em suas contribuições que visam melhorar o desempenho da manufatura com base na manutenção.

1.Explorar a contribuição do MES na melhoria do desempenho do chão de fábrica e a mensuração de indicadores-chave de desempenho.

2.Analisar a integração do MES à I4.0, tanto nos aspectos manufatura e digitalização de processo.

3.Identificar como a TPM pode envolver os diferentes níveis e funções de uma organização, e o aumento da eficiência geral dos equipamentos de produção, mensuradas pelo MES.

4.Construir uma Heurística de Implantação do Pilar de Manutenção Autônoma, suportado pelo MES.

5.Construir um Modelo de Maturidade baseado na metodologia TPM.

Para responder à questão de pesquisa declarada neste trabalho, com base na literatura pesquisada, é visto que o pano de fundo do progresso tecnológico onde a gama de problemas e demandas para humanos no espaço da fábrica mudará. Máquinas, peças e componentes tornam-se cada vez mais autônomas e auto-organizados, então cenários de manufatura ainda mais complexos se tornarão gerenciáveis, em contraste com a abordagem *Computer Integrated Manufacturing* (CIM) dos anos 80, o movimento da Indústria 4.0 não está gravitando em direção às instalações de produção sem trabalhadores. Em vez disso, as pessoas devem ser

integradas na estrutura física cibernética de tal forma que suas habilidades e talentos individuais podem ser plenamente realizados (GORECKY; SCHMITT; LOSKYLL; ZÜHLKE, 2014).

Um dos princípios básicos do TPM é a melhoria dos equipamentos, por meio do conhecimento agregado aos participantes, sendo que os japoneses foram os primeiros a perceber a importância de melhoria na manutenção de equipamentos para obtenção de vantagem competitiva no mercado (AHUJA; KHAMBA, 2008). A integração do TPM e do MES poderá auxiliar a tomada de decisões mais rápidas e eficientes e principalmente manter as melhorias realizadas para sanar os defeitos. Essa união trará maturidade para a empresa e seus colaboradores e otimizará todos os seus ativos, trazendo grande vantagem competitiva (SOUZA; NEVES, 2020).

Os Sistemas de Execução de Manufatura têm sido fundamentais no desempenho, qualidade e agilidade necessários para os desafios criados pelos negócios de manufatura globalizados e provavelmente continuarão a ser (ALMADA-LOBO, 2015). A Indústria 4.0 visa melhorar a produtividade atendendo às crescentes demandas dos clientes por uma resposta mais rápida em tempo real por meio do controle de produção descentralizado. Essas expectativas podem ser atendidas pelo MES para melhorar o desempenho, a qualidade e a agilidade dos negócios de manufatura globalizados (RAO *et al*, 2020).

Para o primeiro objetivo de pesquisa pode-se ter como base de apoio, que o MES pode ter diferentes grupos de usuários com interfaces e módulos personalizados para cada grupo. Por exemplo, o pessoal de gestão pode ter acesso ao monitor módulo de integração e pode ser capaz de calcular indicadores-chave de desempenho (KPIs), a partir dos dados adquiridos, enquanto os operadores da máquina podem ter acesso ao seu módulo de planejamento (MANTRAVADIA; MØLLER, 2019).

Por um lado, o MES orienta a execução de planos de produção bruta em operações detalhadas no chão de fábrica. Por outro lado, fornece à empresa indicadores-chave de desempenho (KPIs), permitindo decisões comerciais (CHEN; VOIGT, 2020). Os dados condensados oferecidos pelo MES como indicadores-chave de desempenho (KPIs) constitui uma ferramenta de gestão especialmente útil, esse objetivo pode ser alcançado por meio de números de desempenho adequados fornecidos pelo MES por turno de produção, os desvios não devem ser conhecidos apenas alguns dias depois, mas idealmente devem ser publicados online ou pelo menos por turno para os funcionários da produção (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009).

Para elucidar o segundo objetivo desta pesquisa, pode-se ter como sustentação que o MES é responsável por coletar os dados no chão de fábrica, analisá-los por meio de técnicas

matemáticas adequadas e extrair as informações necessárias para fornecer uma imagem exata do estado atual do processo. Possivelmente a análise será realizada em tempo real, a fim de tomar decisões para controlar o processo com a rapidez necessária. Diante deste histórico, o MES desempenha um papel estratégico no apoio à Indústria 4.0, sendo uma plataforma que permite a transformação dos dados coletados no chão de fábrica em informações que podem alimentar os modelos de simulação e por sua vez habilitar a digitalização da Manufatura (D'ANTONIO *et al*, 2017). A indústria 4.0 pode de fato ser descrita como a digitalização da indústria, pois com a Indústria 4.0 os processos de produção adquirirão capacidades de fabricação modulares e flexíveis que podem tomar decisões por conta própria, mas que também podem ser integradas com outras áreas de produção (ÖZTÜRK, 2017).

Para o terceiro objetivo de pesquisa pode-se afirmar que o foco das práticas de TPM envolve todo o ciclo de vida do equipamento. Além do suporte da alta administração ser uma diferenciadora chave para a TPM, é preciso haver aceitação em todos os níveis da organização, o TPM promove e implementa atividades baseadas em equipe em todos os níveis dentro da organização com o mesmo objetivo em mente de zero defeitos e zero avarias (KANTI; CUDNEY, 2018). Portanto a gestão executiva precisa trabalhar em correlação direta com a linha de frente, representada pelos supervisores com o gerenciamento intermediário e com as funções de suporte. O TPM coordena todo o pessoal por meio da participação de práticas importantes, incluindo fornecedores, operadores, engenheiros e pessoal da manutenção.

Considerando que o departamento de manutenção é o centro tradicional de programas de manutenção preventiva, TPM envolve trabalhadores de todos os departamentos e níveis, incluindo o chão de fábrica e executivos seniores, cujo intuito é garantir a operação eficaz do equipamento (AHUJA; KHAMBA, 2008).

A base da maximização da produtividade proposta pelo TPM é a eliminação das perdas, principalmente em empresas fabris. Muitas vezes, as empresas investem em equipamentos mais modernos quando poderiam fazer uma melhor gestão de seus ativos, extraindo deles o máximo potencial a custos próximo do zero, uma vez que eles já devem ter sido depreciados (RIBEIRO, 2014).

De maneira a explicar ainda o terceiro objetivo de pesquisa deste trabalho, pode-se identificar através da literatura que o MES, por meio de suas funcionalidades pode contribuir para mensurar a eficácia do TPM, nos estudos realizados por Tortorella *et al* (2021) apesar de diferentes abordagens realizadas por cada empresa, por exemplo: sistemática, restrita ou sequencial, argumentos de todos os estudos de caso indicaram uma percepção positiva das eficiências da inovação em relação à integração das tecnologias I4.0 nas práticas de TPM. Em

outras palavras, essa integração resultou em melhorias desempenho da gestão de manutenção, mesmo em aplicações isoladas. Hoje, os modernos sistemas de execução de manufatura – MES, podem oferecer aplicações em tempo real. Eles geram mapas atuais e até históricos para equipamentos de produção e podem, assim, ser usados como base para processos de otimização (KLETTI, 2007).

O quarto objetivo está descrito na Heurística de Implantação do Pilar de Manutenção Autônoma, suportado pelo MES.

O quinto objetivo está descrito na Proposta de Modelo de Maturidade na Metodologia TPM.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O referencial teórico deste trabalho tem como base estudos na área de Engenharia de Produção, Gestão da Produção e Operações, Sistemas de Informação e Tecnologias Digitais, e Sistemas Organizacionais, temas estes vinculados ao Mestrado Profissional em Gestão e Desenvolvimento da Educação Profissional do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza.

### 2.1 Sistema de Execução da Manufatura – MES

Os processos industriais precisam ser constantemente remodelados com base na crescente demanda de tecnologias com o intuito de reduzir custos, por meio do aumento da produtividade e qualidade do produto, além de aumentar a confiança, eficiência e a segurança operacional, assim a observação integrada do desempenho dos processos de produção em tempo real foi rapidamente admitida.

A MESA (*Manufacturing Execution Solutions Association*) é uma organização conceituada sendo a primeira organização a adotar o conceito do MES, e é, provavelmente, a mais experiente a reportá-lo, segundo afirma o autor Kletti (2007).

Apesar de sua breve história, o termo MES foi usado pela primeira vez em 1990, a posição da indústria é que praticamente todas as operações de fabricação, independentemente do tamanho, complexidade e tipo de produto, podem se beneficiar de alguma forma do MES integrado. Com o MES o processo de fabricação torna-se orientado por informações e um contribuinte mais forte tanto para a produtividade geral quanto para a viabilidade financeira da empresa.

Do ponto de vista dos operadores de chão de fábrica, o MES é um suporte digital padronizado para coletar as informações que antes eram tratadas manualmente (D'ANTONIO *et al*, 2017). Assim, o processo de fabricação torna-se orientado por informações e um contribuinte mais forte tanto para a produtividade geral quanto para a viabilidade financeira da empresa.

Como acontece com qualquer investimento seja em tempo ou finanças, é imperativo identificar o benefício esperado desse investimento. Para o MES esse benefício é o resultado da solução de problemas de fabricação, pois aborda riscos e cria uma vantagem competitiva para manter ou expandir o negócio. Após algum tempo, a indústria de manufatura percebeu a necessidade de softwares para o gerenciamento eficaz dos processos envolvidos na manufatura.

No início dos anos 80, aplicativos de software mais avançados surgiram com a introdução do *Manufacturing Resource Planning* (MRP), o que melhorou principalmente o gerenciamento de recursos e materiais, mas não era adequado para o controle e gerenciamento em tempo real das operações de chão de fábrica (RAO *et al*, 2020).

O MES pode notificar falhas e outros problemas melhorando assim, a eficiência do processo de monitoramento da produção. Ele pode monitorar as partes visíveis e invisíveis do equipamento durante o processo produtivo e tempos de inatividade, o que ajuda a agilizar a resposta das soluções. Além disso, fornece informações precisas sobre motivos de desvios e paradas não programadas.

Além dos detalhes mais profundos, também pode fornecer funções de análise e tendência em tempo real, bem como pode ajudar a alta administração e outros funcionários do chão de fábrica a adotarem uma atitude mais confiante e assertiva, o que afeta a empresa como um todo, mas para que tudo isso aconteça, as máquinas precisam ser equipadas com computação e comunicação suficientes para ter a capacidade de agir de forma independente, sem intervenção humana direta (D'ANTONIO *et al*, 2017).

Os Sistemas de Execução de Fabricação têm sido fundamentais no desempenho, qualidade e agilidade necessária para os desafios criados pelos negócios de manufatura globalizados, cujos principais pilares a serem considerados para uma melhor aplicação do MES são a descentralização, integração vertical, conectividade e celular, computação em nuvem e análise avançada (ALMADA-LOBO, 2015).

Segundo D'Antônio *et al* (2017), um MES tem dois objetivos principais: no primeiro, o sistema tem que identificar o ótimo planejamento de sequência, levando em consideração as restrições do processo, como os tempos para processamento e configuração, assim como a capacidade das estações de trabalho. Considera, ainda, os requisitos e as necessidades dadas pelo nível organizacional. O sistema visa gerenciar e alocar recursos, como a equipe e o material necessário para o processo de manufatura.

O segundo objetivo de um MES é o de gerenciar o fluxo de dados ascendente. A coleta de dados é necessária para alimentar os Sistemas *Ciber-Físicos*, ou simplesmente chamados CPS. Este é desencadeado pelo desenvolvimento recente de baixo custo e sensores facilmente disponíveis. O MES é responsável por coletar os dados no chão de fábrica, eles devem ser analisados por meio de técnicas matemáticas adequadas para extrair as informações e assim fornecer uma imagem do estado atual do processo, proporcionando, também, uma maior rastreabilidade de produtos, tornando-os mais inteligentes.

Acredita-se que o MES desempenhe um papel central no caminho da empresa (empresa de manufatura) em direção à I4.0, porque a flexibilidade e transparência nos processos são os principais objetivos dela. No entanto, a maneira como uma empresa utiliza os recursos do MES determinará se ela será capaz de atingir seus objetivos da I4.0 (MANTRAVADIA; MØLLER, 2019).

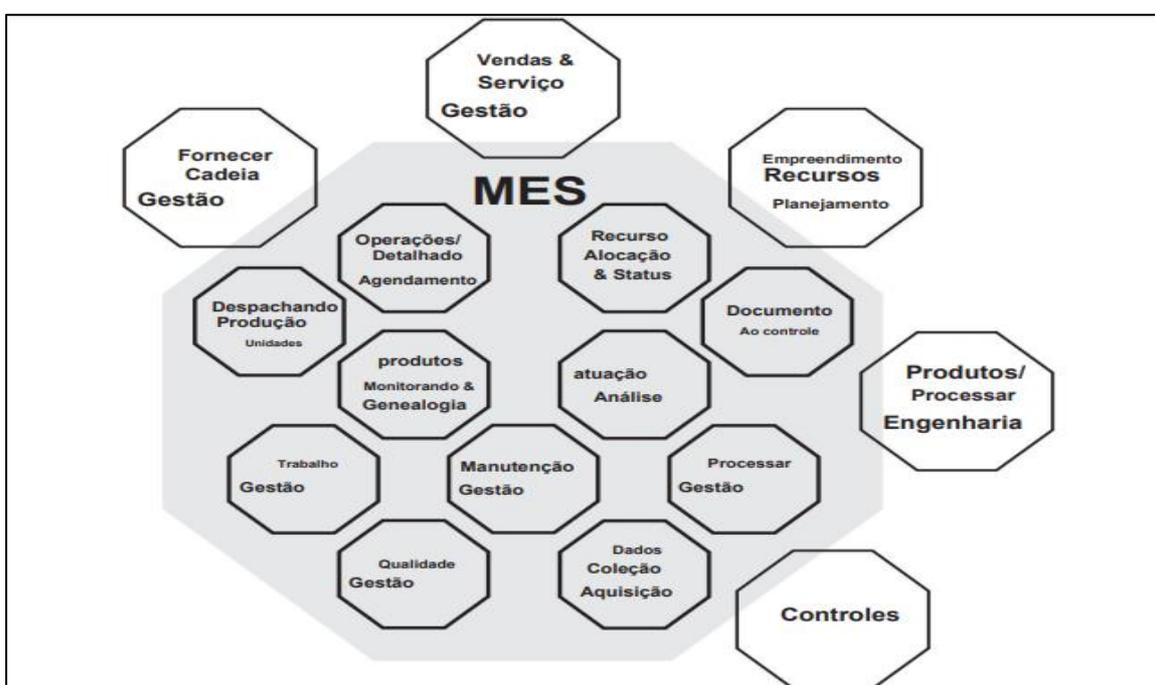
De acordo com os autores Meyer, Fuchs e Thiel (2009, p. 03), os principais grupos de funções de um MES estão descritos abaixo e ilustrados na Figura 01, temos as funções do MES e conexões para outros sistemas:

- 1. Planejamento preciso do fluxo de trabalho:** Este grupo prevê o planejamento de sequência ideal em relação às condições básicas relevantes (tempos de configuração e tempo de processamento) com base nos recursos disponíveis;
- 2. Gestão de recursos de manutenção:** Gestão e monitoramento dos recursos relevantes (pessoal, máquinas e ferramentas);
- 3. Controle da unidade de produção:** Controle do fluxo das unidades de produção com base em pedidos e lotes. Os eventos durante a produção em andamento são respondidos imediatamente e, se necessário, o plano é ajustado;
- 4. Controle de informações:** Todas as informações relevantes para o processo de produção (CAD, projetos, especificações de teste, requisitos de conformidade ambiental e instruções de segurança) são disponibilizadas ao pessoal no momento certo e no lugar certo, a equipe pode usar o sistema para registrar desvios;
- 5. Registro de dados operacionais:** Registro automático ou manual de todos os dados operacionais relacionados à produção vinculados à unidade de produção;
- 6. Gestão de pessoal:** Registro de horas de trabalho do pessoal e potencial para editar em caso de ausência e férias;
- 7. Gestão da qualidade:** Análises de dados de medição relacionados com a produção em tempo real para salvaguardar a qualidade do produto e poder identificar problemas e pontos fracos em tempo útil;
- 8. Gestão de processos:** Monitoramento do processo de produção real, incluindo funções de gerenciamento de alarmes;
- 9. Gestão de manutenção:** Registrar o uso do material operacional e as horas de uso para iniciar as tarefas de manutenção periódica e preventiva. O sistema também suporta a execução da manutenção;

**10. Rastreabilidade do lote:** Registro de todos os dados relacionados à produção em toda a cadeia de produção para garantir que todos os produtos fabricados sejam rastreáveis;

**11. Análise de desempenho:** Desde os tamanhos fabricados até o tempo de inatividade, interrupções, contadores de peças etc., os índices gerenciais são produzidos prontamente, em tempo real, se possível, para permitir uma avaliação simples da eficiência da produção e detecção de problemas, onde formatos de diagrama são disponibilizados para o usuário.

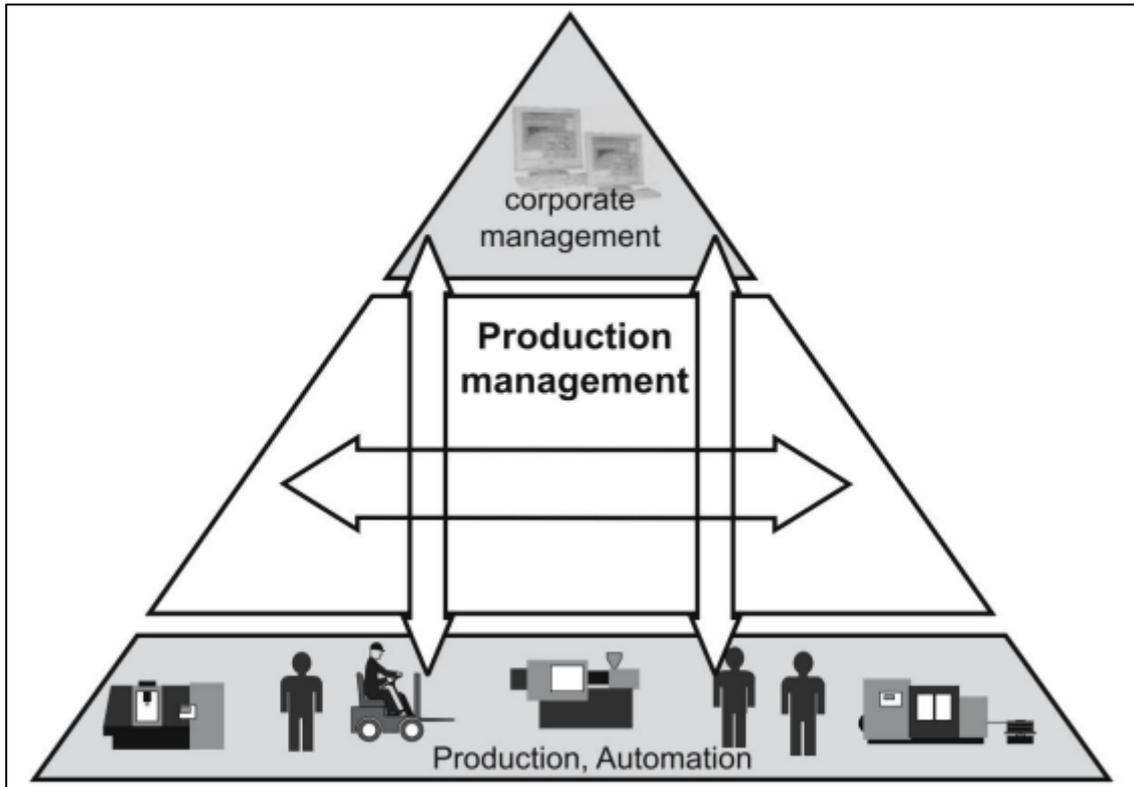
Figura 01: Funções do MES e conexões para outros sistemas.



Fonte: Adaptado de MESA (1997).

A atenção atualmente dada à integração vertical mostra a importância do papel do MES na arquitetura de uma empresa e garante que os diferentes níveis da empresa sejam abastecidos no momento certo com informações (da forma que precisam) dos demais níveis, é importante para o funcionamento eficaz de toda a empresa. A integração horizontal no domínio MES é uma instância especial de implementação e permite um trabalho eficaz com os diferentes grupos de funções em um MES, essa chamada integração horizontal é, portanto, um requisito importante para que um sistema MES forneça um suporte efetivo ao gerenciamento da produção (KLETTI, 2007), conforme ilustrado na Figura 02.

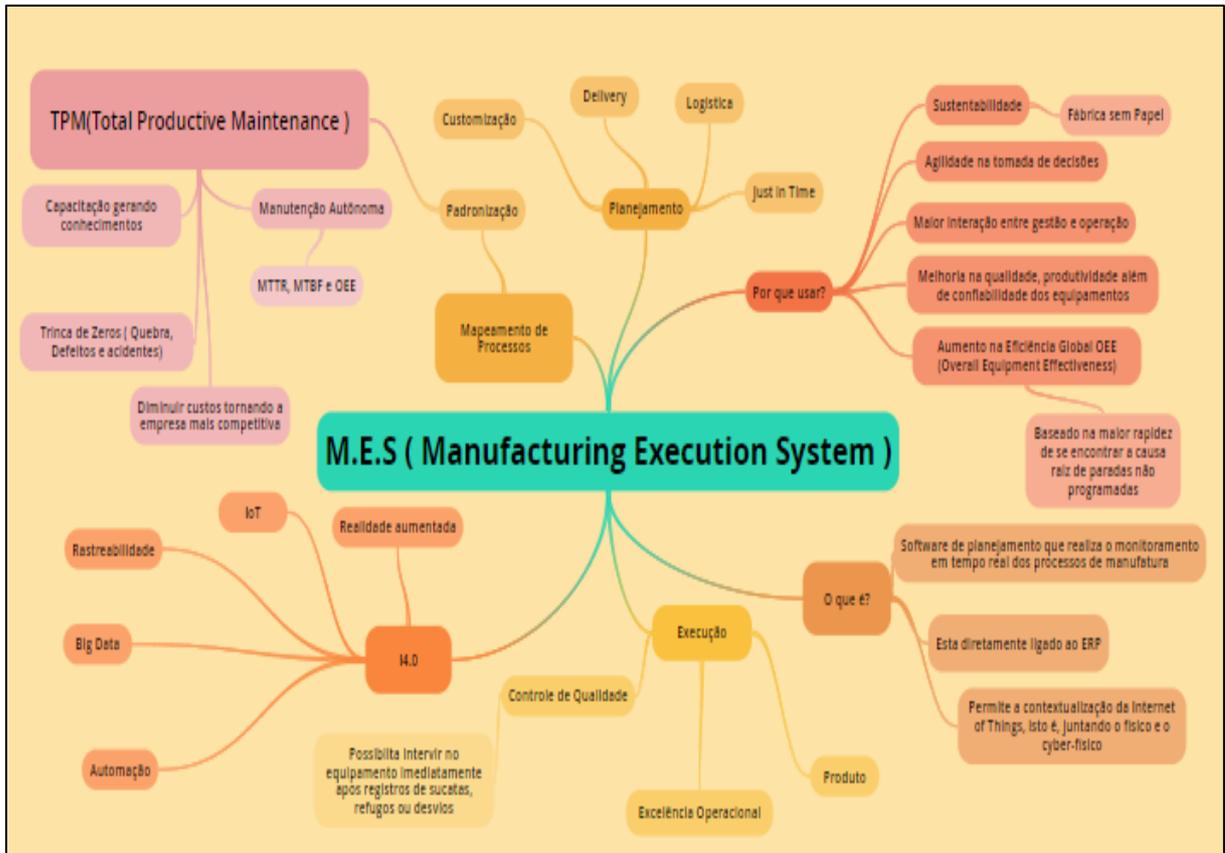
Figura 02: Integração horizontal e vertical do MES



Fonte: KLETTI (2007, p. 38).

As tecnologias habilitadoras da I4.0 estão intrinsicamente ligadas aos sete passos da Manutenção autônoma, tendo-as como aliadas fundamentais para a modernização e otimização do processo produtivo por meio de uma coleta de dados eficiente e confiável, o mapa mental do MES logo abaixo tem por objetivo interligar conceitos, fazer associações, memorizar conteúdos e planejar a aprendizagem sobre o tema MES.

Figura 03: Mapa Mental MES – Funcionalidades e integração com TPM



Fonte: a autora (2022)

## 2.2 Manutenção Produtiva Total – TPM

Em geral, pode-se resumir que o TPM é uma metodologia que funciona como uma ferramenta, em que o objetivo é manter os equipamentos e máquinas utilizados na produção de bens e serviços em condições ótimas para poder fornecer produtos e/ou serviços que atingem e até superam as expectativas dos clientes (DÍAZ; GARCÍA; MARTÍNEZ, 2019).

Por muitos anos, a manutenção foi considerada um mal inevitável da gestão organizacional. Porém percebeu-se que as máquinas danificadas representam recursos não utilizados e ordens de produção que não são entregues no prazo ou cuja qualidade não atende as especificações. Isso afeta toda a empresa, principalmente os lucros.

O primeiro registro de implementação do TPM pertence a Denso Corporation do Grupo Toyota. Na TPM sabe-se quem usa o equipamento é quem o conhece melhor, por ser um conjunto de procedimentos que tem como objetivo garantir que os equipamentos de um processo produtivo sejam sempre capazes de executar as tarefas necessárias, de modo a não interromper a produção. Para que o TPM seja efetivo, deve haver o envolvimento direto de todas as pessoas que operam os processos (WERKEMA, 2012).

A engenharia de manutenção que é uma área estratégica dentro das grandes empresas faz uso desta ferramenta para otimizar seu desempenho, aumentar a disponibilidade e minimizar custos de equipamento. A metodologia TPM é uma cultura que minimiza as perdas e aumenta a eficiência da manutenção. E aliando essa cultura às tecnologias da I4.0, o atingimento do sucesso é feito de forma mais assertiva, rápida, eficaz e o mais importante de forma contínua (ALMEIDA; FABRO, 2019).

O TPM é uma filosofia de manufatura enxuta e seu objetivo é obter uma produção sem avarias, sem pequenas paradas ou funcionamento lento, zero defeitos e acidentes. Ele enfatiza a manutenção proativa e preventiva para maximizar a vida útil e a produtividade do equipamento e este objetivo é alcançado através da capacitação de todos os funcionários que, por sua vez, assumem a responsabilidade por esses equipamentos. É aqui que os operadores de produção desenvolvem habilidades para concluir tarefas de manutenção em sistemas de equipamentos. Isto é um processo formal de seleção de tarefas apropriadas e transferência de responsabilidade por cuidados específicos de equipamentos para o operador de produção (HANSEN, 2001).

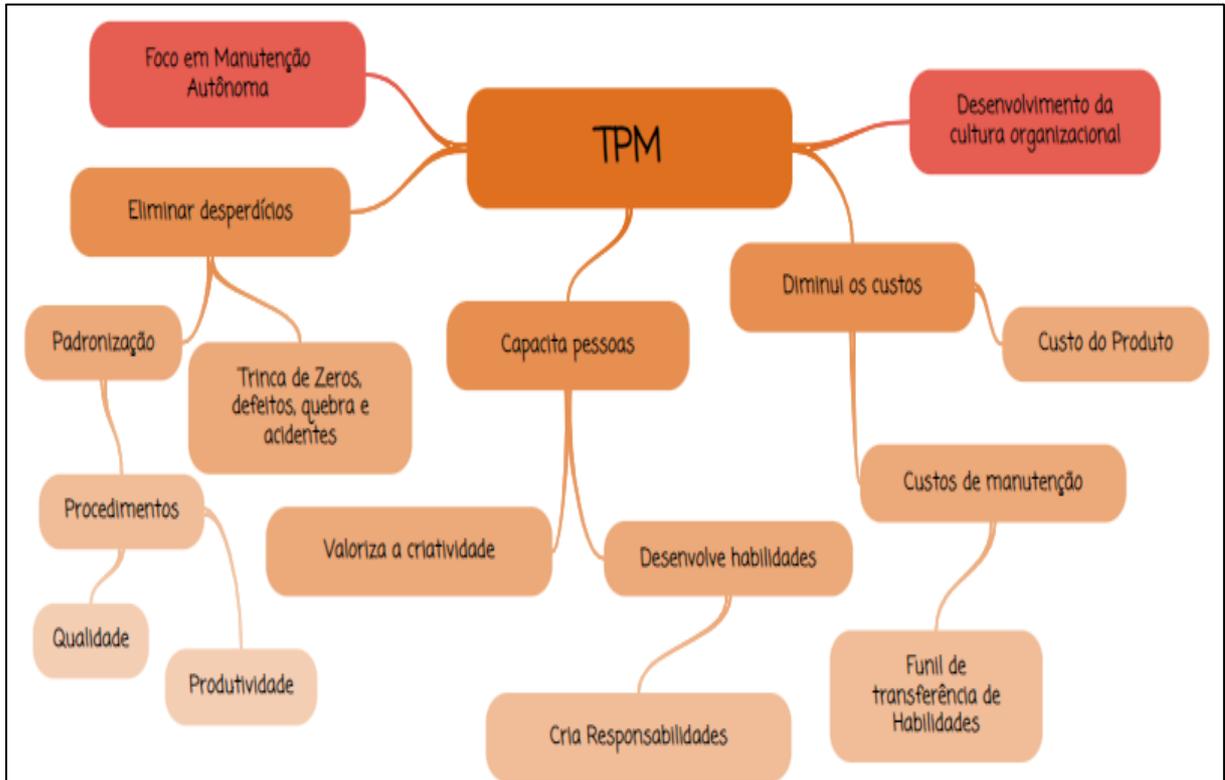
Ao longo do tempo, essas mudanças são muito positivas na atitude dos operadores e manutentores que, atingindo metas e trabalhando em equipe, irão compartilhar conhecimentos e experiências. Portanto, essas pessoas estão em uma posição ideal para contribuir com reparos e modificações para melhorar a qualidade e a produtividade.

O TPM coordena todo o pessoal por meio da articulação entre agentes cruciais, como fornecedores, operadores, engenheiros e pessoal da manutenção, promovendo e efetivando atividades baseadas em equipe em todos os níveis dentro da organização com o mesmo objetivo em mente de zero defeitos e zero avarias (KANTI; CUDNEY, 2018).

Introduzir o TPM nas operações de países em desenvolvimento com economias instáveis, como é o caso Brasil, é um grande desafio, pois, além das contínuas mudanças tecnológicas, o ambiente geralmente não é propício à transformação, principalmente por falta de mão de obra qualificada, além de ser altamente competitivo, logo abaixo temos um mapa

mental com intuito de fazer associações, memorizar conteúdos e planejar a aprendizagem sobre o tema TPM.

Figura 04: Mapa Mental TPM – Visão e Objetivos



Fonte: a autora (2022)

### 2.3 Implementação

A implementação do TPM não é uma tarefa simples, pois não há uma série de etapas rigorosas a serem seguidas para garantir o sucesso de sua implementação. No entanto, deve assentar em determinados conceitos que lhe permitam estabelecer a base para garantir o seu sucesso (DÍAZ; GARCÍA; MARTÍNEZ, 2019).

Uma vez que o objetivo da manutenção produtiva total é melhorar a produtividade, além de redução nos tempos inativos, a implementação do TPM exerce um grande impacto na Eficácia Geral do Equipamento (*Overall Equipment Effectiveness* - OEE) ao longo do tempo, quando bem aplicado e aceito pela organização como um todo.

Segundo explica o autor Nakajima (1988), geralmente, a implementação bem-sucedida do TPM requer:

1. Eliminação das seis grandes perdas para melhorar a eficácia do equipamento;
2. Um programa de manutenção autônomo;
3. Um programa de manutenção programada para o departamento de manutenção;
4. Aumento das habilidades do pessoal de operações e manutenção; e,
5. Um programa inicial de gerenciamento de equipamentos.

O TPM resulta nos seguintes benefícios para a empresa: elevação do nível de conhecimentos e da capacitação dos funcionários da produção e da manutenção; melhoria do ambiente de trabalho; redução do tempo de parada por quebra dos equipamentos, e dos custos associados a esse tipo de interrupção da produção; e aumento da capacidade produtiva, o que pode gerar aumento de receita e das margens de contribuição dos produtos fabricados (WERKEMA, 2012).

Segundo explica o autor Ribeiro (2016), os cinco passos considerados fundamentais para o sucesso do TPM são:

Passo 01: Sensibilização adequada da alta e média gerência;

Passo 02: Estruturação adequada do TPM;

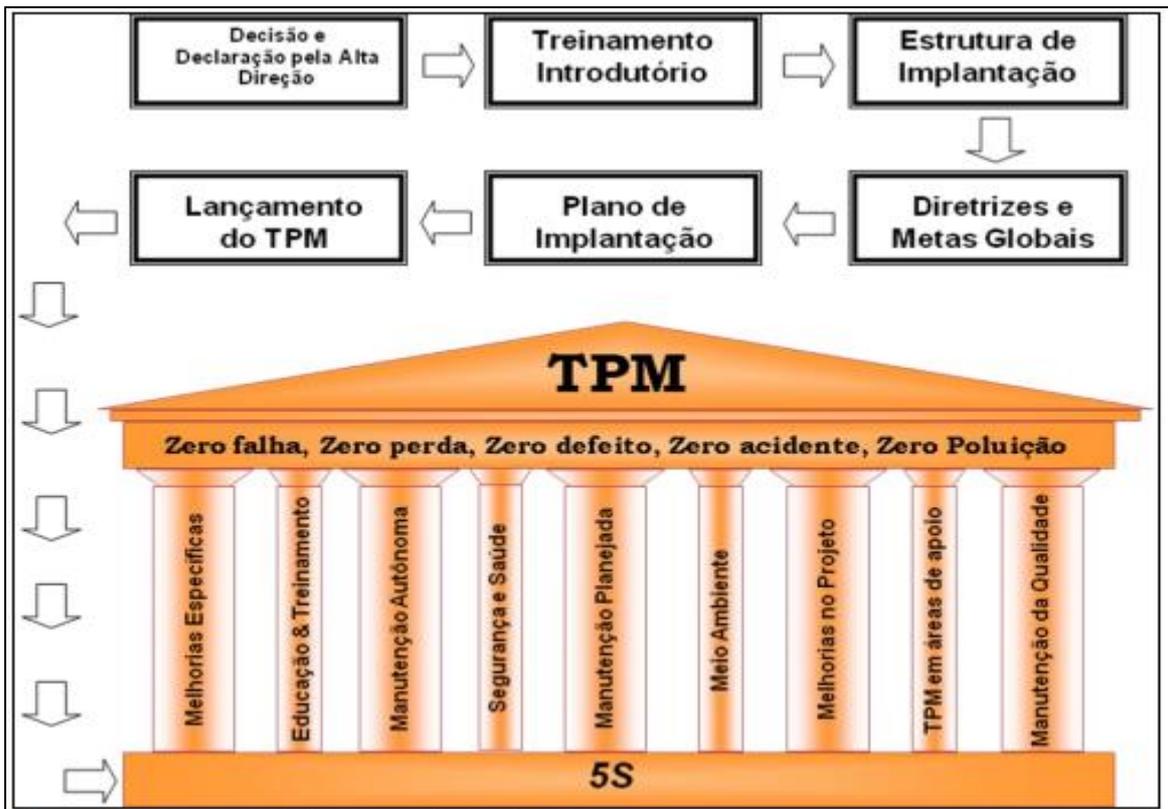
Passo 03: Capacitação adequada dos Supervisores;

Passo 04: Monitoramento adequado do plano;

Passo 05: TPM como rotina da empresa.

As etapas a serem desenvolvidas na implementação de TPM compreendem atividades preparatórias, o lançamento e a execução dos pilares que suportam o programa. A Figura 05 apresenta as etapas de implantação do TPM, desde a fase de planejamento até a execução, por meio do 5S, dos pilares técnicos e dos pilares complementares.

Figura 05: Etapas de Implantação do TPM



Fonte: RIBEIRO (2016, p.18).

Descrevendo essas etapas acima ilustradas na Figura 05, têm-se:

1. Pilar Melhorias Específicas: Segundo explica o autor Ribeiro (2018), esse pilar busca a eficiência máxima dos equipamentos pela utilização plena de suas respectivas funções e capacidades, sendo essa eficiência a consequência da eliminação criteriosa das perdas;
2. Pilar Manutenção Autônoma: Segundo explicam os autores Oliveira, Martins e Xavier (2009), o Pilar de Manutenção Autônoma é uma ferramenta essencial para agilizar os resultados na área produtiva. Esse pilar se fundamenta em desenvolver, nos operadores, o sentimento de responsabilidade e cuidado pelos equipamentos, como também a habilidade de inspecionar e identificar os focos de falha e defeitos, além de realizar pequenos reparos, ajustes e regulagens;
3. Pilar de Manutenção Planejada: Conforme explica o autor Ribeiro (2003, p. 29), com este pilar se estrutura uma equipe de manutenção para que se possa estabelecer, juntamente com os operadores do equipamento, um sistema eficaz de manutenção de forma a eliminar as perdas relativas às quebras e falhas, os retrabalhos de manutenção, as falhas de operação, produtos defeituosos e as pequenas paradas;

4. Pilar de Educação e Treinamento: de acordo com o referido autor, as atividades deste pilar têm como característica o de tornar os colaboradores da empresa aptos para desempenharem suas atividades e responsabilidades dentro um clima transparente e motivador, as quais devem ser conduzidas e revisadas diariamente como uma rotina, objetivando prevenir ocorrências de problemas gerados pela falta de capacitação (RIBEIRO; 2003);
5. Pilar Manutenção da Qualidade: este pilar visa eliminar completamente as condições geradoras de defeitos, pois a qualidade é um dos principais valores requeridos pelos clientes em um produto ou serviço almejados. Este pilar muda os conceitos de controle da qualidade focado para a qualidade por meio do processo (FURLAN; LEÃO, 2010);
6. Pilar Controle Inicial: o pilar Controle Inicial, conforme explica o autor Ribeiro (2003), tem por objetivo o de identificar todas as melhorias realizadas nos equipamentos e produtos existentes, visando à aquisição de novos equipamentos e/ou projetos com o máximo de eficiência;
7. Pilar Administração e Logística (*Office TPM*): as áreas administrativas processam grandes quantidades de informações que podem ser as causas de falhas, e por isso se deve efetivar o TPM nesse departamento também. Este pilar traz a redução do lead time da informação, e é desenvolvido da mesma forma que o TPM se desenvolve no setor produtivo; e,
8. Pilar SHE (Segurança, Higiene e Meio Ambiente): de acordo ainda com o autor Ribeiro (2003) este pilar objetiva atingir acidente ‘zero’, bem como eliminar e prevenir toda condição que afete a segurança, a higiene e o meio ambiente, observando a qualidade de vida das pessoas e a integridade dos ativos industriais.

A implantação do TPM é uma eficaz ferramenta de planejamento, controle de produção e manutenção, o cotidiano das empresas de manufatura é pautado pela satisfação dos clientes, pontualidade nas entregas dos produtos, eficácia na execução da produção e dos processos de fabricação (DUARTE; CUNHA; CRAVEIRO, 2013).

O TPM desde o seu início obteve uma aceitação por parte das empresas, pois embora os resultados obtidos não sejam imediatamente perceptíveis, os resultados são altamente significativos e trazem grandes benefícios para a empresa que decide implementá-lo (DÍAZ; GARCÍA; MARTÍNEZ, 2019).

## 2.4 KPI's TPM

KPI é a abreviação de “*Key Performance Indicator*” ou “Indicador Chave de Desempenho”, sendo considerado um parâmetro que reflete o grau de cumprimento das metas estabelecidas ou um fator crítico de sucesso. Os exemplos mais conhecidos da área de MES são disponibilidade, índice de qualidade e OEE (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009), onde em complemento, temos o conceito de eficácia geral do equipamento (OEE), escrito pela primeira vez em 1989 em um livro intitulado ‘Programa de Desenvolvimento TPM: Implementando Manutenção Produtiva Total’ do escritor Seiichi Nakajima em 1989. O TPM deu origem a este indicador, o qual é empregado para avaliar o status de eficiência geral da instalação.

Assim, os funcionários são treinados para manter os equipamentos com os quais trabalham e para procurar maneiras de aumentar a eficiência geral do equipamento, uma combinação de disponibilidade, desempenho e qualidade. OEE não é apenas uma ferramenta de avaliação, mas também de identificação de espaço para melhorar. Na prática, o OEE é calculado a partir de dados de produção coletados do processo de fabricação, sendo que para que haja uma coleta de maior precisão, o MES se torna um aliado fundamental.

OEE é o padrão ouro para medir a produtividade de fabricação em um índice simples. Isto descreve a verdadeira porcentagem de tempo produtivo (KANTI; CUDNEY, 2018). O OEE é utilizado para medir o desempenho de equipamentos e máquinas ou o conjunto destes, possibilitando a indicação de quais os recursos possuem o menor índice de eficiência e que, por isso, necessitam do desenvolvimento de melhorias ou que podem ser utilizados como benchmark (RAPOSO, 2011).

Segundo Meyer, Fuchs e Thiel (2009), o índice mais importante e mais utilizado para avaliar a eficiência das máquinas e equipamentos de produção existentes é a eficiência geral do equipamento (OEE). O OEE é o produto de três outras figuras-chave, cada uma representando um aspecto diferente do desempenho de uma máquina:

Para o cálculo do OEE, tem-se as fórmulas:

- $OEE\% = Disponibilidade\% * Performance\% * Qualidade\%$
- $Disponibilidade\% = (Tempo\ produzindo / Tempo\ programado) * 100\%$
- $Performance\% = (Quantidade\ Prod.\ Real / Quantidade\ Prod.\ Teórica) * 100\%$
- $Qualidade\% = (Quantidade\ de\ bons / Quantidade\ Total) * 100\%$

De acordo com as diretrizes padrões do TPM, o mínimo de 85% OEE deve ser alcançado para ser considerado de classe mundial ou World Class.

Uma vez que o objetivo da manutenção produtiva total é melhorar a produtividade, além de redução nos tempos inativos, a implementação do TPM exerce um grande impacto na eficácia geral do equipamento (OEE) ao longo do tempo, quando bem aplicado e aceito pela organização como um todo. O progresso deve ser medido por meio de indicadores de produtividade adequadamente selecionados para atender às necessidades da organização e sua capacidade de acessar ou gerar dados (KOSIERADZKA, 2017).

Segundo Ribeiro (2016), os funcionários são treinados para manter os equipamentos com os quais trabalham, além de procurar maneiras de aumentar a eficiência geral do equipamento e identificar espaço (oportunidade) para melhorias. A seguir, menciona-se o significado de cada indicador de acordo com as diretrizes do TPM e conhecidos como PQCDSM:

- **P – Produtividade** – aumento da produtividade (OEE) e aumento da qualidade do trabalho;
- **Q – Qualidade** – detecção e redução de defeitos, mitigação da reclamação do cliente final;
- **C – Custo** – redução da mão-de-obra, redução dos custos de manutenção, energia conservada, retrabalhos e perdas materiais;
- **D – Entrega (*delivery*)** – estoque reduzido, aumento do *Turn Over* do estoque, OTIF (*On-Time In-Full* ou “no prazo e completo”);
- **S – Segurança** – zero acidentes e zero poluição, segurança no manuseio de materiais e máquinas;
- **M – Moral** – aumento das ideias de melhoria submetidas e aumento do comprometimento (engajamento) individual por meio de *kaizens*, lição de um ponto e das equipes de manutenção autônoma.

É importante lembrar que o TPM utiliza de outros dois indicadores de manutenção *Mean Time Between Failures* (MTBF) ou o Tempo Médio Entre Falhas do Equipamento, e *Mean Time To Repair* (MTTR) ou o Tempo Médio para Reparo de Equipamento, segundo listam os autores Mohan *et al* (2021), são obtidos da seguinte forma:

**MTBF** = (Tempo total disponível – Tempo perdido) / (Número de parada)

**MTTR** = (Tempo total de reparo) / (quantidade de falhas)

O MTBF é uma medida básica da confiabilidade de um sistema e o MTTR indica a eficiência na ação corretiva de um processo, sendo considerados como dois indicadores de desempenho que devem ser utilizados para ampliar o conhecimento da empresa sobre os processos e reduzir perdas de produtividade ou qualidade nos produtos oferecidos.

Nesse sentido os autores Sharma, Singh e Rastogi (2018) ressaltam que “a metodologia TPM não só aumenta a eficácia do sistema de fabricação, mas também aumenta a eficiência de toda a organização por meio da participação obrigatória e da melhoria nos indicadores-chave de desempenho do TPM”.

As fábricas inteligentes devem ser capazes de prever seu padrão de falha de equipamento, num futuro próximo, a fim de tomar ações corretivas para aumentar o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e reduzir o Tempo Médio para retificar (MTTR) (MOHAN; *et al*, 2021).

## 2.5 Pilares TPM

O 5S é considerado a base da metodologia TPM, pois, sem ele, a implementação afundará sob o peso da desorganização, indisciplina e ineficiência. Ele resulta em um local de trabalho limpo e visualmente organizado que é autossustentável. O 5S é um método cujo objetivo é promover e manter a limpeza e a organização das áreas de trabalho, tanto administrativas quanto de manufatura (WERKEMA, 2012).

A ideia de ser o ‘dono’ da máquina surge como um incentivo de engajamento, já que são estes funcionários que estão todos os dias na máquina e acabam tendo o senso de propriedade, aumentando sua responsabilidade e conhecimento para atuação, principalmente em atividades básicas de lubrificação, limpeza, manutenção, inspeção, tendo a iniciativa de tentar resolver o problema de forma rápida e eficaz sem recorrer a um especialista.

Dessa forma, listam-se a seguir os 5 sentidos:

1. Seiri – Senso de separação, seleção e classificação;
2. Seiton – Senso de organização e arrumação;
3. Seiso – Senso de limpeza, inspeção e zelo;
4. Seiketsu – Senso padronização, saúde e higiene; e,
5. Shitsuke – Senso de disciplina, autodisciplina, autocontrole e respeito.

A Manutenção Total Produtiva é Formada por oito pilares e cada pilar possui sua importância em particular, todavia, o conjunto pode ser prejudicado caso um dos pilares não seja desenvolvido corretamente, pois cada um possui sua aplicação. Para aplicar o conceito TPM em uma empresa de manufatura, necessita-se de uma base sólida e de pilares fortes. A base do TPM é o 5S, enquanto o TPM consiste em oito pilares. Estes pilares, conforme explica o autor Setiawan (2021) estão focados principalmente em técnicas proativas e preventivas para aumentar a confiabilidade das máquinas e equipamentos de produção.

1. **Melhoria específica** - Perda Zero – Eliminação das perdas;
2. **Manutenção autônoma** - Aprimoramento da capacitação técnica;
3. **Manutenção planejada** - Quebra Zero – Restauração, confiabilidade e maximização do uso dos equipamentos;
4. **Educação e Treinamento** - Reeducação das pessoas com a mudança de atitude e comportamento;
5. **Segurança, saúde e meio ambiente** - Acidentes zero – Minimização do risco de acidentes do trabalho e riscos ambientais;
6. **Manutenção da qualidade** - Defeito zero – Consolidação da qualidade assegurada;
7. **Controle Inicial** - Minimização das ineficiências em novos produtos, processos e equipamentos;
8. **Administrativo** – Áreas de apoio e ataque às perdas em processos não produtivos.

Seus oito pilares visam estabelecer proativamente a confiabilidade das máquinas e engajamento nas pessoas, já que elas são o centro desse sistema e devem ser continuamente treinadas para identificar e eliminar os desperdícios. É um sistema que se baseia em um conjunto claro de princípios e estruturas e não deve ser interpretado como um conjunto de ferramentas ou técnicas a serem aplicadas ao acaso.

Ainda assim, este trabalho visa um enfoque maior no pilar de manutenção autônoma, pois compõe um dos oito pilares do TPM. É considerado o sustento de toda metodologia. No pilar de manutenção autônoma, os trabalhadores assumem maior responsabilidade na manutenção do maquinário, sem a necessidade de ter funcionários separados para cada máquina ou linha de produção para operar e fazer reparos de manutenção (SANDRINI, 2021).

Eles serão treinados ao serem colocados em contato com ferramentas que permitem a aquisição de conhecimentos para exercer as duas tarefas, sendo este o método mais abrangente para garantir a integridade da máquina e garantir a qualidade do produto.

## 2.6 Manutenção Autônoma

Este pilar consiste em desenvolver nos operadores o sentimento de propriedade e zelo pelos equipamentos e a habilidade de inspecionar e detectar problemas em sua fase incipiente e até realizar pequenos reparos, ajustes e regulagens (RIBEIRO, 2017).

Nesse sentido, os autores Bona *et al.* (2021, p. 424) aduzem que:

[...] soluções inovadoras, como remotas ou de automanutenção, são habilitados pela tecnologia da I4.0, oferecendo aos profissionais industriais, tomadores de decisão e gerentes sêniores, a possibilidade de passar de políticas convencionais para soluções mais atraentes e poderosas, como a manutenção autônoma.

Deve-se notar que o conhecimento altamente qualificado ainda é valorizado em todos os setores, visto que eles podem antecipar riscos com sucesso e tomar decisões críticas de otimização muito mais cedo do que qualquer sistema automatizado (KHAN; *et al*, 2020,). O TPM como um todo é um processo proativo e opera na prevenção de ocorrências de problemas, cujos defeitos nos produtos ou as avarias nos equipamentos são resolvidos e sua causa eliminada. Por isso, exige equipes proativas em sua implementação, chamados de ‘Facilitadores’. Esses facilitadores de processo determinam o quão bem um processo é capaz de funcionar ao longo do tempo e são treinados principalmente no pilar de manutenção autônoma.

Este pilar é a manutenção de máquinas que envolvem os operadores de produção como usuários para realizar a manutenção básica. O usuário da máquina pode ser descrito como uma espécie de solucionador de problemas em última instância que dentro dos processos de produção auto-organizados, especifica um controle de produção adaptado e monitora sua implementação correta.

Na interação entre o CPPS e as pessoas, o funcionário da I4.0 configura uma autoridade de controle e tomada de decisão de nível superior (SIEPMANN, 2016).

A implementação deste pilar visa aumentar os conhecimentos, competências e responsabilidades dos operadores de produção relacionadas às máquinas para que a produtividade geral aumente. Esta manutenção é a base para outras manutenções, vários padrões de manutenção são aplicados desde limpeza, inspeção e lubrificação (SIEPMANN, 2016).

Figura 06: Os Sete Passos da Manutenção Autônoma

7	Manutenção Autônoma Completa	Dá a precisão e o desempenho ideal Finalmente a qualidade do produto alcança sem comprometer a classificação de desempenho
6	Organização e Arrumação	
5	Inspeção Autônoma	
4	Inspeção Geral	Conhece a função e estrutura do equipamento
3	Padrões de limpeza e lubrificação	
2	Contramedidas na origem dos problemas	Essas etapas detectam os problemas e esclarecem procedimentos do equipamento
1	Limpeza inicial	

Fonte: Adaptado de Salim; Rameshkumar (2016).

- 1°. Passo – **Limpeza Inicial** – como parte da limpeza inicial, detecta e corrige qualquer problema que possa afetar a segurança ou o ambiente. Também considera algumas dimensões, como Identificação de Perigos e Riscos, Aspectos Principais e Impactos;
- 2°. Passo – **Eliminação das fontes de contaminação e locais de difícil acesso** – a melhoria visa facilitar a limpeza e a inspeção e melhora na segurança e no ambiente, tratando os principais pontos através de melhoria específica e eliminação de perigos e aspectos;
- 3°. Passo – **Elaboração de Padrões Provisórios** – inclui os procedimentos chave de segurança nos padrões provisórios e limpeza e de verificação e preza pelo estabelecimento do sistema de controle de impactos e riscos;
- 4°. Passo – **Inspeção Geral** – quanto mais as pessoas souberem sobre seu equipamento e seus processos, mais seguramente podem trabalhar; investe-se também no treinamento em segurança, saúde e meio ambiente, transmissão do conhecimento e habilidades detalhadas para a operação;
- 5°. Passo – **Inspeção Autônoma** – execução de medidas específicas para impedir a ocorrência de operação errônea, inspeções de segurança;
- 6°. Passo – **Padronização** – visa garantir a execução das atividades para que ocorressem sempre da mesma forma, evitando desvios, minimizando assim os impactos à segurança e/ou ao meio ambiente foco nos equipamentos ao redor, ferramentas, iluminação e layout, ou seja, no processo. Assim, é necessária também a padronização desses processos; e,

7°. Passo – **Gestão autônoma** – as condições essenciais para o gerenciamento da segurança e do meio ambiente devem ser mantidas de forma autônoma; os operadores devem cuidar do seu próprio local de trabalho.

Neste pilar, a manutenção é realizada por operadores de máquinas em vez de técnicos de manutenção dedicados. Isso dá aos operadores a 'propriedade' de seus equipamentos e aumenta o conhecimento e as habilidades dos operadores sobre estes. Além disso, a MA garante que o equipamento seja bem limpo, inspecionado e lubrificado. Problemas em evolução são identificados antes que se tornem falhas, o que permite que a equipe de manutenção se concentre em tarefas mais avançadas (KANTI; CUDNEY, 2018).

## 2.7 Indústria 4.0

É de extrema importância para as empresas que desejam competir efetivamente na atual concorrência global integrar a I4.0 em seus processos e operações de fabricação (ÖZTÜRK, 2017).

A I4.0 trata, principalmente, sobre como tecnologias avançadas são reunidas e utilizadas para construir um ambiente de manufatura inteligente. O conceito de digitalização da I4.0 envolve a digitalização de todos os processos industriais que integram a cadeia de valor. Esta digitalização permite empresas combinem o aprendizado de máquinas, análises e percepções preditivas para melhorar decisões (RAO *et al*, 2020).

Tecnologias emergentes, como a *Internet* das Coisas (IoT), a *Internet* dos Serviços (IoS), computação em nuvem e análise de *Big Data* têm impulsionado as iniciativas da I4.0, dando origem a novos paradigmas para sistemas de manufatura (JASKÓA; *et al*, 2020).

O paradigma I4.0 pressupõe um sistema complexo e totalmente digitalizado que afeta todas as unidades e classes em uma fábrica. Para uma fábrica existente atender aos requisitos da I4.0, transformações digitais, reorganizações e investimentos são necessários para o desenvolvimento do MES no ambiente da I4.0. Deve-se focar nos seguintes requisitos: apoio à informatização, garantia da visibilidade, assegurar a transparência, aumento da capacidade preditiva e melhoria da adaptabilidade (JASKÓA *et al*, 2020).

Pontua-se que, a I4.0 fomenta o desenvolvimento de uma indústria cujas principais características compreendem máquinas conectadas, produtos inteligentes e sistemas e soluções

inter-relacionadas (TORTORELLA; SILVA; VARGAS, 2018), cujos produtos manufaturados serão produtos inteligentes, baseados em conectividade e poder de computação.

A principal ideia por trás de produtos inteligentes é que eles irão incorporar capacidades de autogestão. Por outro lado, os equipamentos de fabricação se transformarão em CPPS, Sistemas de Produção *Ciber-Físicos*, tendo como objetivo o aprimoramento de máquinas, bem como de seu próprio poder computacional, aproveitando uma ampla gama de sensores e atuadores incorporados, além de conectividade e poder computacional. O CPPS conhece seu estado, sua capacidade e suas diferentes opções de configuração e poderá tomar decisões de forma autônoma (FILIPOV; PLAMEN, 2016).

### **2.7.1 Evolução da Indústria**

Tendo avançado rapidamente nos últimos anos, pode-se mencionar que a tecnologia da informação também exerce um impacto no desenvolvimento industrial. Desde o início da revolução industrial, houve três etapas importantes que resultaram em um grande aumento da produtividade industrial, juntamente com o avanço da tecnologia (ÖZTÜRK, 2017).

A Primeira Revolução Industrial começou no século XVIII, na Inglaterra, e, como resultado, pois inseriu uma ampla gama de mudanças em uma perspectiva global, alavancou o processo de transformação de uma economia agrícola e artesanal para uma economia dominada pela indústria e fabricação de máquinas a vapor (ÖZTÜRK, 2017).

Corroborou com a mecanização dos processos e, assim, o nascimento da indústria trouxe grandes mudanças na economia mundial e no estilo de vida humano, uma vez que acelerou a produção de commodities e o desenvolvimento dos recursos naturais e principalmente do modo de trabalho. Inseriram-se novas possibilidades à própria indústria.

A Segunda Revolução Industrial começou no século XIX com a descoberta da eletricidade e com a produção em linhas de montagem. A eletricidade e o petróleo surgiram como novas formas de energia a partir de meados da década de 1870.

O uso dessas novas fontes de energia e o desenvolvimento da química e do aço novas indústrias levaram à evolução e criação de invenções, como automóveis e telefones, o que mudou a vida e principalmente o modo como às pessoas se locomoviam. Passaram a viajar de trem, carro e bicicleta. Ao mesmo tempo, ideias e notícias eram disseminadas por meio de jornais, rádio e telégrafo.

A terceira Revolução Industrial teve início após a segunda guerra mundial. Deu-se, sobretudo, por meio da automação parcial que se utilizava de controles e computadores

programáveis por memória, o que demarcou o surgimento dos equipamentos eletrônicos, telecomunicação e computadores, sendo que a tecnologia de comunicação digital e a internet mudaram a forma como transmitimos informações, fazemos negócios e interagimos uns com os outros. Vale lembrar também do avanço científico, que rompeu fronteiras e propagou-se por todo o mundo.

Em resumo cronológico esses estágios são: o início do uso de máquinas movidas à vapor em fábricas no final do século XVIII; a produção em massa baseada na energia elétrica no início do século XX; e a proliferação da automação na indústria graças às tecnologias eletrônicas e da informação desde a década de 1950. Hoje em dia, temos testemunhado a quarta etapa da revolução industrial, em que as cadeias de valor estão ligadas de ponta a ponta por meio de sistemas cibernéticos e processamento dinâmico de dados.

Esta etapa é a Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0 que, pela primeira vez, veio à tona na Feira de Hannover, na Alemanha, e logo atraiu considerável atenção (ÖZTÜRK, 2017). O setor industrial passou por várias revoluções. A mecanização foi à primeira etapa. Em seguida, veio à produção em massa e a eletricidade em uma segunda etapa. A terceira ocorreu na década de 1970, com a introdução da automação e equipamentos de TI, inserindo, dessa forma, novas tecnologias digitais para as fábricas (MULLET; SONDI; RAMAT, 2021).

### **2.7.2 Facilitadores da Indústria 4.0**

Existe uma ampla gama de tecnologias ditas como ‘Habilitadoras da Indústria 4.0’, no entanto, para este trabalho focar-se-á em tecnologias que, de alguma forma, estão ligadas ao MES e ao TPM, assim visa-se elucidar como de fato elas podem viabilizar o processo evolutivo industrial com o uso do MES e do TPM para uma fábrica inteligente, mais produtiva e lucrativa.

Criar uma fábrica inteligente só é possível com ‘Sistemas Cibernéticos Físicos’ (CPS) e ‘Internet das Coisas (IoT)’, segundo afirma o autor Öztürk (2017). Embora ainda haja muita confusão sobre as implicações para a fabricação, a confusão começa com o que importa na I4.0. Consideram-se os facilitadores de tecnologia para este modelo industrial o: *Mobile, Cloud, Big Data Analytics, Machine to Machine (M2M)*, Impressão 3D, Robótica e assim por diante, já que existem muitas empresas com conhecimentos específicos. Embora essas sejam de fato as tecnologias disruptivas que desencadeiam a transformação, essa revolução da I4.0 vai muito além delas (ALMADA-LOBO, 2015).

Especificamente sobre a figura e o papel desempenhado pelo trabalhador, pontua-se que ele, enquanto componente mais flexível da estrutura *cyber*-física, também intervirá manualmente no sistema de produção organizado de forma autônoma. O suporte ideal ao lidar com a gama versátil de problemas é fornecido pelas interfaces de usuário móveis e sensíveis ao contexto e pelos sistemas de assistência focados no usuário (GORECKY *et al*, 2014).

A I4.0 está preparada para impulsionar mudanças nos processos de produção, engenharia e no cenário competitivo global por meio do desenvolvimento de redes digitais. Isso apresenta novos desafios aos gerentes de equipamentos de processo, tornando a confiabilidade e a meta de TPM de *Zero Breakdowns* ainda mais cruciais (TURANOGLU *et al*, 2019).

O quadro 01 se refere a um modelo que lista as principais tecnologias que podem afetar os pilares do TPM.

Quadro 01: Modelo das principais tecnologias que podem afetar os pilares do TPM:

Principais tecnologias da Indústria 4.0	Abreviaturas
Manufatura Aditiva (Impressão 3D)	SOU
Realidade Aumentada ou Virtual (Interação Homem-Máquina)	IHM
Robôs autônomos	RA
Análise de Big Data	BDA
Ciber segurança	CS
Integração de sistemas horizontal e vertical (máquina a máquina Comunicação)	M2M
Simulação	SIM
A Internet das Coisas (objetos inteligentes, como sensores, atuadores e nuvem Informática)	IoT

Fonte: Adaptado de TURANOGLU *et al* (2019).

Muitos dos avanços em tecnologia que formam a base da I4.0 já são empregados na fabricação, mas com ela, eles transformarão a produção: células isoladas e otimizadas se unirão a um fluxo de produção totalmente integrado, automatizado e otimizado, levando a uma maior eficiência e mudando as relações tradicionais de produção entre fornecedores, produtores e clientes, bem como entre humanos e máquinas (RÜBMANN *et al*, 2015).

Dentre sua maioria, as tecnologias mencionadas são: *Big Data Analytics*, Robôs Autônomos, Simulação, Integração de Sistemas (Vertical e Horizontal), *Internet* das Coisas e *Internet* das Coisas e Serviços, Segurança Cibernética, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva/Impressão 3D e Realidade Aumentada ou Virtual, Sistemas *Ciber*-Físicos CPS,

Sistemas de Produção *Ciber-Física* CPPS, Digitalização e M2M comunicação máquina a máquina.

### ***Big Data Analytics***

‘*Big Data*’ são dados que excedem o normal em termos de ‘3V’ (volume, variedade, velocidade), ou seja, em termos de quantidade de dados, heterogeneidade dos dados e frequência de acumulação de dados, ou a necessidade de o rótulo de velocidade de processamento além da medida (SCHÖNING; DORCHAIN, 2014).

Os serviços de *Big Data* e análise baseados em nuvem são uma parte essencial do processamento de dados coletados da produção (SIEPMANN, 2016). A análise baseada em grandes conjuntos de dados surgiu apenas recentemente no mundo da manufatura, pois otimiza a qualidade da produção, economiza energia e melhora o serviço do equipamento.

Em um contexto da I4.0, a coleta e avaliação abrangente de dados de muitas fontes diferentes (equipamentos e sistemas de produção, bem como sistemas de gerenciamento corporativo e de clientes) se tornarão padrão para apoiar a tomada de decisões em tempo real (RÜBMANN *et al*, 2015).

### **Robôs autônomos**

Fabricantes em muitos setores há muito tempo usam robôs para lidar com tarefas complexas, mas os robôs estão evoluindo para uma utilidade ainda maior. Eles estão se tornando mais autônomos, flexíveis e cooperativos. Eventualmente, eles irão interagir uns com os outros e trabalhar com segurança lado a lado com os humanos e aprender com eles. Esses robôs custarão menos e terão uma gama maior de recursos do que os usados na fabricação hoje (RÜBMANN *et al*; 2015).

### **Simulação**

Na fase de engenharia, simulações em 3-D de produtos, materiais e processos de produção já são utilizadas, mas, no futuro, as simulações também serão empregadas mais amplamente nas operações da planta.

Essas simulações aproveitarão dados em tempo real para espelhar o mundo físico em um modelo virtual, que pode incluir máquinas, produtos e humanos. Isso permite que os operadores testem e otimizem as configurações da máquina para o próximo produto em linha no mundo virtual antes da troca física, reduzindo, assim, os tempos de configuração da máquina, com ênfase no aumento da qualidade (RÜßMANN *et al*, 2015).

### **Integração de Sistemas (Vertical e Horizontal)**

Além da já referenciada transparência da cadeia de suprimentos, alcançada por meio da integração horizontal em toda a cadeia de suprimentos, a conformidade, o controle ou o cumprimento de qualquer outro processo de negócios corporativo relacionado é garantido pela integração vertical (ALMADA-LOBO; 2015).

Na integração horizontal, a integração de sistemas de TI e produção em rede visa permitir que dados e informações sejam trocados entre a empresa, locais geograficamente remotos e entre todas as partes interessadas em toda a cadeia de valor. Descreve a integração de sistemas de clientes, fornecedores, localizações de empresas distribuídas, bem como fornecedores e produtores de serviços externos, entre os quais há um fluxo de materiais, energia e informação, no próprio cenário vertical do sistema (SIEPMANN, 2016).

Na integração vertical, o IoTS também permite acesso direto a sistemas de TI e produção. Assim, a partir da integração vertical, os dados e as informações devem ser coletados diretamente do nível de campo, processados no nível de controle, gestão, operacional e da empresa e, como resultado, as informações de controle correspondentes devem ser devolvidas às instalações de produção (SIEPMANN, 2016).

Todavia, com a I4.0, empresas, departamentos, funções e capacidades se tornarão muito mais coesos, à medida que as redes de integração de dados universais e entre empresas evoluem e permitem cadeias de valor verdadeiramente automatizadas (RÜßMANN *et al*, 2015).

### ***Internet of Things - IOT - Internet das Coisas e Internet das Coisas e Serviços (IoTS)***

A discussão sobre a realização de aplicações da *Internet* das Coisas é muitas vezes caracterizada por uma discussão muito intensa e orientada para a tecnologia. Assume-se implicitamente que a I4.0 é primordialmente um tema tecnológico e que os exemplos de

aplicação implementam complexidade técnica sem precedentes e possuem alto potencial de inovação tecnológica, este é um mal-entendido básico.

Em vez disso, as tecnologias básicas da *Internet* das Coisas, como Auto-ID, sistemas embarcados ou banda larga, redes sem fio estão disponíveis há anos e estão sendo constantemente desenvolvidas em termos de maturidade técnica (JOCHEN *et al*, 2014).

Com a *Internet* das Coisas, mais dispositivos, às vezes incluindo até produtos inacabados, serão enriquecidos com computação incorporada e conectados usando tecnologias padrão. Isso permite que os dispositivos de campo se comuniquem e interajam entre si e com controladores mais centralizados, conforme necessário.

Ele também descentraliza a análise e a tomada de decisões, permitindo a recuperação em tempo real (RÜßMANN *et al*, 2015). A '*Internet* das Coisas e Serviços' é derivada do termo '*Internet* das Coisas'. Baseia-se na rede completa de todos os objetos do cotidiano e representa a segunda fase do desenvolvimento tecnológico da I4.0 (SIEPMANN, 2016).

### **Segurança Cibernética**

Ele gerencia a complexa tarefa de trocar dados de produtos e produção entre vários parceiros por meio de apadrinhamentos. Como resultado, comunicações seguras e confiáveis, bem como um gerenciamento sofisticado de identidade e acesso de máquinas e usuários, são essenciais (RÜßMANN *et al*, 2015).

### **Computação em Nuvem**

A computação em nuvem e a análise avançada constituem o quarto pilar do MES do futuro. Tanto o CPS quanto o CPPS gerarão enormes quantidades de dados, que precisam ser armazenados e processados. A visão da Fábrica Inteligente da I4.0 requer alcançar uma visão holística das operações de manufatura. Claramente, isso só pode acontecer integrando dados de várias fontes diferentes (ALMADA-LOBO, 2015).

As empresas já estão empregando softwares baseados em nuvem para alguns aplicativos empresariais e analíticos, mas, com a Indústria 4.0, sabe-se que uma maior quantidade de empreendimentos relacionados à produção exigirá maior compartilhamento de dados entre sites e limites da empresa. Ao mesmo tempo, o desempenho das tecnologias de nuvem melhorará, atingindo tempos de reação de apenas alguns milissegundos.

Como resultado, os dados da máquina e a funcionalidade serão cada vez mais implantados na nuvem, permitindo mais serviços orientados por dados para sistemas de produção. Mesmo sistemas que monitoram e controlam processos podem se tornar baseados em nuvem (RÜßMANN *et al*, 2015).

### **Manufatura Aditiva/Impressão 3D**

As empresas apenas começaram a adotar a manufatura aditiva, como a impressão 3D, principalmente para prototipar e produzir componentes individuais. Com o *Industry 4.0*, esses métodos de fabricação aditiva serão amplamente utilizados para produzir pequenos lotes de produtos personalizados que oferecem vantagens de construção, como projetos complexos e leves. Sistemas de fabricação de aditivos descentralizados e de alto desempenho reduzirão as distâncias de transporte e o estoque disponível (RÜßMANN *et al*, 2015).

### **Realidade Aumentada ou Virtual**

Os humanos atuam como a última autoridade decisória e estão totalmente integrados ao processo de produção e controle, por meio de interfaces homem-máquina adequado (realidade virtual e realidade aumentada) (SIEPMANN, 2016).

Os sistemas baseados em realidade aumentada oferecem suporte a uma variedade de serviços, como a seleção de peças em um depósito e o envio de instruções de reparo por meio de dispositivos móveis. Esses sistemas estão em sua infância, mas, no futuro, as empresas farão um uso muito mais amplo da realidade aumentada para fornecer aos trabalhadores informações em tempo real, cujo intuito é melhorar a tomada de decisões e os procedimentos de trabalho.

### **CPS- *Cyber-Physical Systems***

Sistemas *Ciber-físicos* são simplesmente objetos físicos com softwares incorporados e com expressivo poder de computação. Na I4.0, mais produtos manufaturados serão produtos inteligentes, ou seja, CPS. Com base na conectividade e no poder de computação, a principal ideia por trás dos produtos inteligentes é que eles incorporem recursos de autogerenciamento (ALMADA-LOBO, 2015).

As ferramentas mais importantes ao lidar com um CPS e as informações que ele fornece serão os dispositivos móveis, como *smartphones*, *tablets* e *smartglasses* (GORECKY *et al*, 2014). O termo sistema *cyber* físicos descreve a combinação de sistemas de *software* e *hardware* em uma rede complexa e inteligente na qual cada objeto físico individual tem sua própria identidade (SIEPMANN, 2016).

### **CPPS- *Cyber-Physical Production Systems***

O segundo estágio da I4.0 descreve o uso de sistemas *Ciber*-físicos que, quando combinados, como é o caso dos CPPS, são capazes de controlar a produção de maneira descentralizada e adaptável ao contexto através dos limites da empresa. Um CPPS inclui meios de produção inteligentes que possuem informações sobre seu processo de produção individual (SIEPMANN, 2016).

### **Digitalização**

A transformação digital é o gatilho para questionar ou desenvolver paradigmas de produção existentes. Ela oferece às empresas manufatureiras a oportunidade de otimizar fundamentalmente sua criação de valor e explorar novos potenciais de negócios (ROTH, 2016).

Desde o mundo descobrir a máquina a vapor, a eletricidade, as linhas de produção, as energias nucleares e automações, se entendeu que houve a globalização da ‘Quarta Revolução Industrial’, ou Indústria 4.0, fase esta a qual é destinada à utilização de meios digitais, inteligências artificiais e sistemas cibernéticos nos processos da indústria.

Com essa nova revolução, se criou as etiquetas FID (código de barras), *QR Code*, realidade aumentada, realidade virtual e manufatura aditiva, cujo objetivo principal é a de reunir e analisar dados da produção de produtos e serviços para se criar ciclos mais velozes e com mais eficiência e precisão, bem como identificar problemas e desenvolver processos rápidos, flexíveis e eficientes, buscando fazer a integração de todos os sensores para que eles consigam se comunicar entre si e, dessa forma, diminuir o número de falhas na produção para produzir bens e serviços de alta qualidade a custos reduzidos.

Nesse sentido, o autor Garcia explica que:

Para que funcione desta forma foram necessárias a criação das redes de comunicação sem fio, a digitalização da informação, o desenvolvimento de sensores, os robôs

inteligentes, as impressoras 3D, as técnicas de simulação, modelagem e virtualização no projeto de produtos e processos. A utilização destas novas tecnologias permite grandes ganhos de produtividade e um aumento significativo em toda a cadeia produtiva e de gestão, sendo elas mais ágeis e eficientes. Essas mudanças abrem incalculáveis possibilidades para o futuro que demandarão profissionais da mais alta qualificação, com capacidade para desenvolver e aplicar essas tecnologias e criar outras (GARCIA, 2020, p. 49-50).

Dessa forma, pode-se afirmar que o conceito de digitalização industrial deriva desta fase revolucionária, que o planeta vivencia desde meados de 2010, assim, a digitalização industrial é o que define a I4.0. Conforme o homem foi se beneficiando de desenvolvendo com o uso das tecnologias, houve aumento na capacidade de armazenamento de dados e na integração dos sistemas, o que tornou mais fácil de se realizar tarefas de maneira veloz, contínua e automatizada, além de identificar e corrigir erros.

A digitalização é um benefício para as empresas, pois para a gestão de contratos eficiente se faz essencial para a produtividade e desenvolvimento da empresa, além de, é claro, prevenir problemas jurídicos e comerciais, a digitalização promove uma mudança para um mundo inteligente e em rede. Nesse sentido, o autor Graf (2016) explica que em termos da Indústria 4.0, isso significa para a indústria manufatureira e, portanto, também para a indústria discreta que, no futuro, os produtos serão fabricados nas chamadas fábricas inteligentes.

As indústrias ao redor do mundo estão se modernizando com a digitalização, pois está apreendido entre as empresas que a TI depende da digitalização da gestão documental dentro delas, já que os documentos possuem informações essenciais para o bom desempenho das ferramentas digitais.

Compreende-se, portanto, que a gestão documental deve utilizar algumas das ferramentas, como a Inteligência Artificial, para identificar, analisar e extrair informações de documentos de forma automática e com resultados mais rápidos, o que gera mais economia de tempo e dinheiro para o negócio, haja vista que o comportamento do cliente muda frequentemente e a transformação digital deve se tornar uma jornada contínua, um projeto que nunca vai parar. O conceito de digitalização da Indústria 4.0 envolve a digitalização de todos os processos industriais que compõem a cadeia de valor. Essa digitalização permite empresas a combinar aprendizados de máquinas, análises e insights preditivos para melhorar decisões (RAO *et al*, 2020).

### ***Machine to Machine (M2M)***

A troca automatizada de informações entre sistemas técnicos, como máquinas e dispositivos é chamada de comunicação máquina a máquina. O pré-requisito para a realização de tal comunicação M2M padronizada é principalmente a existência inteligência básica em todos os componentes de rede utilizados (SIEPMANN, 2016).

O termo '*Machine to Machine*' significa, em português, 'máquina para máquina', e corresponde à tecnologia que permite a comunicação entre máquinas sem nenhuma assistência manual ou intervenção humana. Esse termo surgiu diante a necessidade de que os aparelhos consigam trocar informação de forma independente de acordo com que cresce a *Internet* das Coisas.

### 3 METODOLOGIA

Esta pesquisa se beneficia do método de racionalismo crítico, que segundo os autores Alves-Mazzotti e Gewandsznajder, esse método foi criado pelo filósofo Karl Popper, o qual ensina que “a busca do conhecimento se inicia com formulações de hipóteses que procuram resolver problemas e continua com tentativas de refutação dessas hipóteses, através de testes que envolvam observações ou experimentos” (ALVES-MAZZOTTI; GEWANDSZNAJDER, 2004).

Popper ao compor a tipologia dos conhecimentos, e estabelecer as bases para sua construção, fez-se por perceber que sua obra poderia ser associada especificamente à construção do conhecimento tanto em ciências naturais, como em ciências sociais. Em sua tipologia, parte do pressuposto de que o senso comum, ou seja, tudo aquilo de uso cotidiano, constitui já um tipo de conhecimento. Ao mesmo tempo diferencia o conhecimento científico do não científico (GALHARDI; BALLERINI; SILVA, 2017).

Assim, pode-se afirmar que este estudo se apropriou desses conhecimentos literários pesquisados para entender e justificar a importância temática. Segundo as autoras Marconi e Lakatos (2010), o método hipotético-dedutivo surgiu na ciência com Sir Karl Raymund Popper. Elas ainda aduzem que “esse autor foi grande crítico do indutivismo e propôs um método que visava a superar a dualidade entre indutivismo versus dedutivismo, ou melhor, entre empirismo versus racionalismo, até então existente na ciência”.

Esse método hipotético-dedutivo de Popper veio a propor a superação do racionalismo e do empirismo puros. Continuando com as autoras referidas, esse o método pode ser chamado também de “método de tentativas e eliminação de erros” (MARCONI; LAKATOS, 2010).

Assim, entende-se que esse método hipotético-dedutivo consiste em “se perceber problemas, lacunas ou contradições no conhecimento prévio ou em teorias existentes” (MARCONI; LAKATOS, 2010). Depois de formulado o problema desenvolve-se conjecturas, soluções ou hipóteses, para serem testadas no que Popper chamava de técnica de falseamento. O falseamento popperiano é o resultado de uma definição entre o que ainda é aceito como correto cientificamente e o que já não possui este mesmo crédito.

Como resultado dessa experimentação ou análise, podem-se avaliar as conjecturas, soluções ou hipóteses, as quais, ainda, podem ser reputadas ou corroboradas. Karl Popper explica que:

[...] se tentarmos considerar sua verdade (do princípio da indução) como decorrente da experiência, surgirão de novo os mesmos problemas que levaram à sua formulação.

Para justificá-lo, teremos de recorrer a inferências indutivas e, para justificar estas, teremos de admitir um princípio indutivo de ordem mais elevada, e assim por diante. [...] a tentativa de alicerçar o princípio da indução na experiência malogra, pois conduz a uma regressão infinita (POPPER, 2001, p. 29).

O método hipotético-dedutivo, portanto, de acordo com Cruz e Ribeiro, “se inicia por uma percepção de uma lacuna nos conhecimentos, acerca da qual se formular hipóteses e, pelo processo de inferência dedutiva, testa a predição da ocorrência de fenômenos abrangidos pela hipótese” (CRUZ; RIBEIRO, 2003, p. 33). De acordo com o autor Gil:

[...] o raciocínio nesse caso é que o conhecimento relativo a leis e teorias não é universal, fazendo-se necessário, então, que hipóteses sejam formuladas e testadas, através do método de dedução, com o objetivo de mostrar a ‘falseabilidade teórica’ dessas leis e teorias (GIL, 2010, p. 35).

Sobre o método indutivo, como observam os autores Cruz e Ribeiro:

[...] baseia-se na generalização de propriedades comuns a certo número de casos, até agora observados, a todas as ocorrências de fatos similares que se verificarão no futuro. Assim, o grau de confirmação dos enunciados traduzidos depende das evidências ocorrentes (CRUZ; RIBEIRO, 2003, p. 34).

Dessa forma, no método indutivo, procede-se de maneira inversa ao dedutivo, parte-se do particular ou específico para o geral, sendo que é por meio de evidências encontradas sobre o objeto de estudo que leis e teorias são então formuladas (CRUZ; RIBEIRO, 2003).

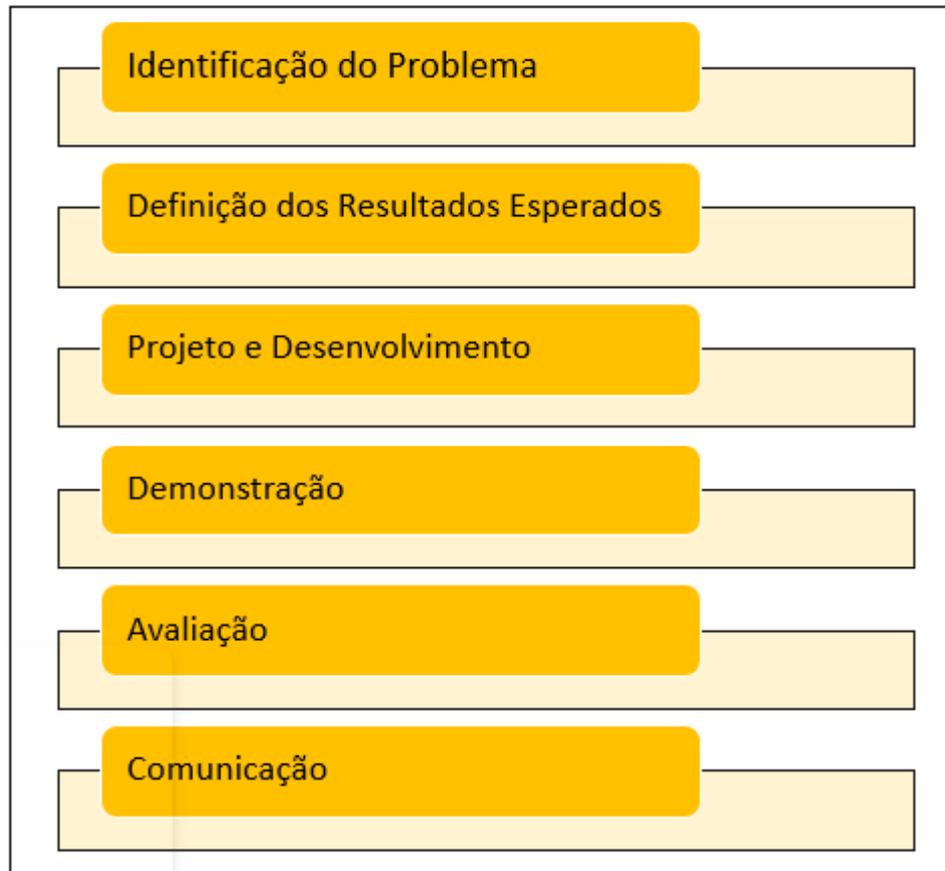
Na primeira fase do trabalho, foi realizada pesquisa bibliográfica para construir teoricamente o tema central do estudo, identificar na literatura os trabalhos pertinentes à abordagem da integração entre o MES e a TPM no ambiente da Indústria 4.0, além de uma pesquisa bibliométrica na base *Web of Science*, para a pesquisa quantitativa e base do quanto o assunto é relevante e atual, pesquisa foi realizada no período de junho de 2021 a março de 2022.

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado com base no DSR - *Design Science Research*, sendo este aplicável no campo da Engenharia e considerado uma estratégia de pesquisa com foco no desenvolvimento de conhecimento sobre ações, processos e sistemas genéricos para abordar problemas de campo ou explorar boas oportunidades. A DSR procura reduzir o distanciamento entre a teoria e a prática, mas mantém o rigor necessário para garantir a confiabilidade dos resultados das pesquisas (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015).

Desta forma, a proposição desse tipo de método de pesquisa, adaptada ao problema da Engenharia de Produção:

[...] conseguiria garantir o rigor necessário às investigações desta área, bem como aumentaria a relevância das pesquisas realizadas na engenharia de produção, diminuindo a lacuna existente entre o que se desenvolve na academia e o que é aplicado nas organizações (DRESCH, 2013, p. 26).

Figura 07: Método de Pesquisa Proposto por Peffers



Fonte: Adaptado de PEFFERS *et al* (2007).

Com base no Método de Pesquisa Proposto por Peffers *et al* (2007, p. 45) tem-se:

1. Primeira Etapa – Identificação do problema;
2. Segunda Etapa – Definição dos resultados esperados;
3. Terceira Etapa – Projeto e Desenvolvimento;
4. Quarta Etapa – Demonstração;
5. Quinta Etapa – Avaliação;
6. Sexta Etapa – Comunicação.

Esse processo é estruturado em ordem nominalmente sequencial; no entanto, não há expectativa de que os pesquisadores sempre prossigam em ordem sequencial da atividade um

até a atividade seis. Na realidade, eles podem realmente começar em quase qualquer etapa e avançar (PEFFERS *et al*, 2007).

Para a primeira etapa da DSR, a identificação de problemas e motivação é crucial, pois parte-se do pressuposto de que um processo de transformação adequado coopera com as tendências de manufatura propostas pela indústria 4.0, sendo essa a questão que motiva esta pesquisa. Percebeu-se que a combinação entre MES e TPM possibilita para as empresas uma série de mudanças benéficas, desde auxílio na tomada de decisão pela alta gestão, por meio da gestão a vista proporcionada pelo MES, até a melhora no chão de fábrica, pois a equipe operacional tornará os equipamentos mais confiáveis, por meio da metodologia TPM.

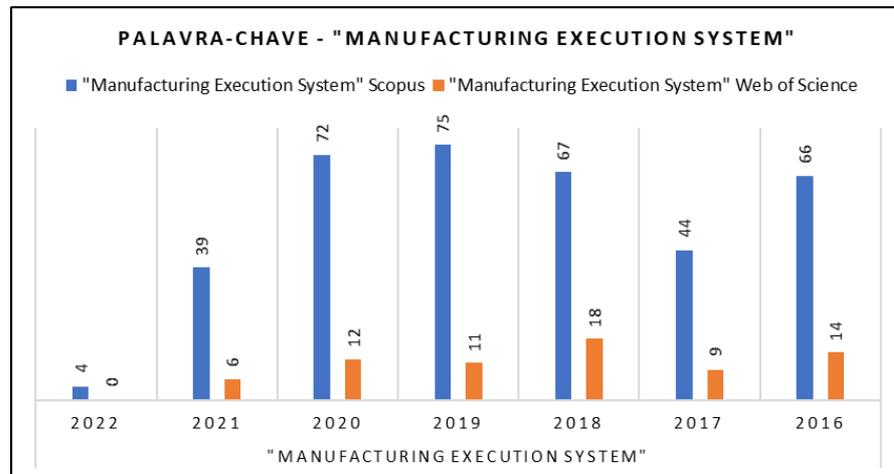
Diante desse cenário, analisou-se como a integração entre uma das tecnologias habilitadoras da I4.0 e uma metodologia pioneira, como o TPM, impacta positivamente na obtenção de uma maior competitividade.

Em relação à natureza e objetivo, este estudo é classificado como básico e exploratório e a partir dele percebeu-se que há poucos estudos teóricos ou empíricos que tratam do objetivo de pesquisa analisado. Por esse fato, e para melhorar o desempenho na busca e seleção dos artigos, foi utilizado o operador booleano ‘AND’, para delimitar a pesquisa relacionada às palavras-chave ‘TPM’ AND ‘I4.0’ e ‘MES’ AND ‘TPM’.

Selecionaram-se os artigos que continham essas palavras-chave, restringindo a amplitude da pesquisa. Por meio de um estudo bibliométrico realizado com filtro que contemplou o período de 2016 até janeiro de 2022, este estudo comprova que o assunto é relevante e atual.

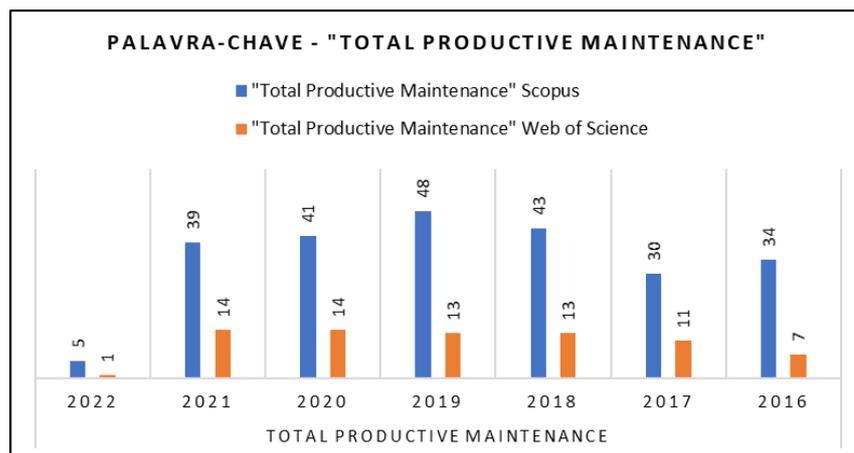
A pesquisa quantitativa foi realizada por meio das bases *Scopus* e *Web of Science* e os dados coletados foram exportados para o *Excel* onde puderam ser encontrados os dados nas figuras abaixo utilizados neste trabalho. A seleção após leitura dos artigos, foi realizada conforme relevância e aderência ao assunto, focou-se em livros, revistas, jornais e periódicos, que agregaram a este trabalho e ao seu referencial teórico, visto que os principais pontos e subdivisões foram relacionados após a leitura de parte dos trabalhos selecionados e foi possível determinar os autores a serem utilizados para a efetivação do trabalho.

A seguir as figuras relacionadas aos resultados encontrados nas bases *Scopus* e *Web of Science*. Para a Figura 08, relativo ao MES, percebeu-se que o tema é bastante atual e muito utilizado no meio acadêmico, e seu uso está intimamente ligado ao tema da I4.0. Na busca realizada na base *Scopus* obteve-se 367 trabalhos e 70 na base *Web of Science*.

Figura 08: Palavras-chaves ‘*Manufacturing Execution System*’

Fonte: *Web of Science* (2022)

Para a Figura 09, relativo ao TPM, percebeu-se que o tema, apesar de ser pioneiro, ainda é bastante utilizado no meio acadêmico. A busca na base *Scopus* resultou em 240 trabalhos e 73 na base *Web of Science*. Os dados apontam que os benefícios não são apenas tangíveis, pois afetam o aumento da produtividade e redução dos custos, sendo perceptíveis ainda os benefícios intangíveis, muito ligados ao motivacional, como autoconfiança na tomada de atitudes, principalmente em grupos pequenos e atividades autônomas.

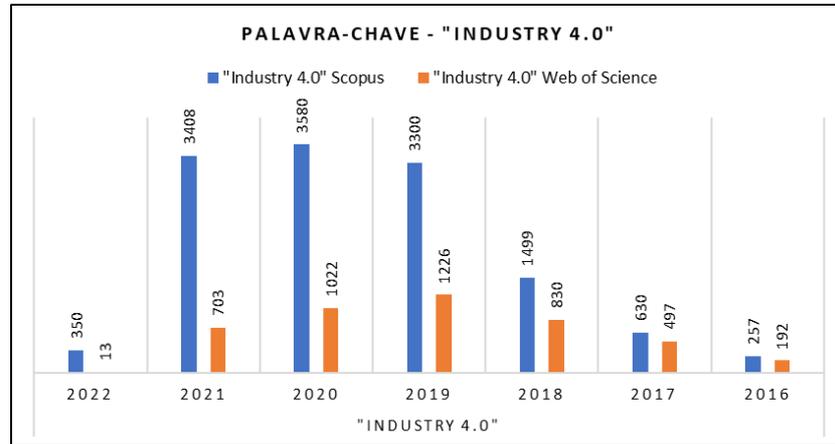
Figura 09: Palavra-chave ‘*Total Productive Maintenance*’

Fonte: *Web of Science* (2022)

Para a Figura 10, relativo a I4.0, percebeu-se que o avanço da tecnologia é inevitável e contínuo. O tema sobre o aperfeiçoamento das máquinas por meio do avanço da automação e da capacidade computacional, além da capacitação profissional, tem sido bastante utilizado não

somente no meio acadêmico, mas na indústria com o um todo. A busca na base *Scopus* resultou em 13.024 trabalhos e 4.483 na base *Web of Science*.

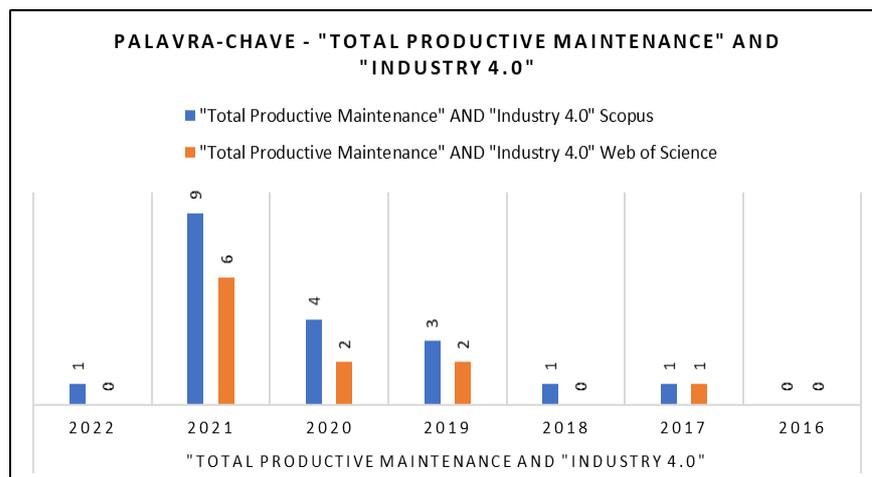
Figura 10: Palavra-chave ‘*Industry 4.0*’



Fonte: *Web of Science* (2022)

Para delimitar a pesquisa relacionada às palavras-chave ‘*Total Productive Maintenance*’ e ‘*Industry 4.0*’ foi utilizado o operador booleano ‘AND’, restringindo a amplitude da pesquisa, visto que o TPM é um tema bastante pioneiro e a I4.0 tem sido desbravada nos últimos anos. A busca na base *Scopus* resultou em 19 trabalhos e 11 na base *Web of Science* como mostra a Figura 11.

Figura 11: Palavras-chaves ‘*Total Productive Maintenance*’ ‘AND’ ‘*Industry 4.0*’

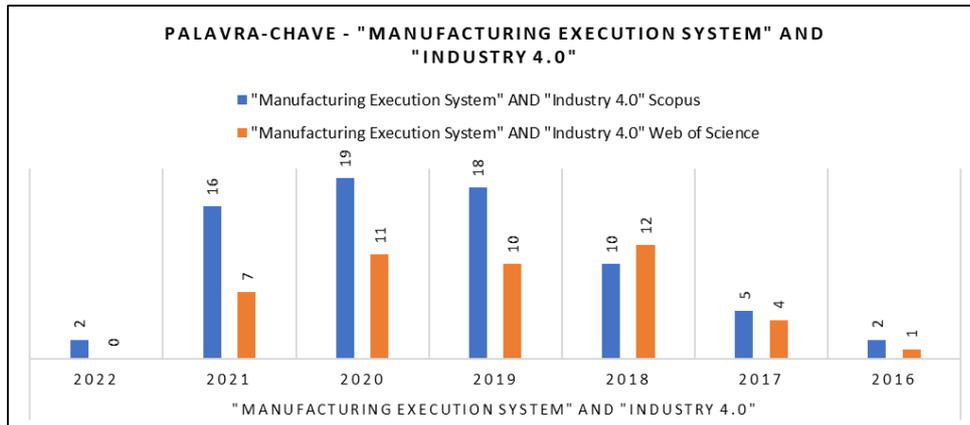


Fonte: *Web of Science* (2022)

Para delimitar a pesquisa relacionada às palavras-chave ‘*Manufacturing Execution System*’ e ‘*Industry 4.0*’ foi utilizado o operador booleano ‘AND’, restringindo a amplitude da

pesquisa, sendo que a maioria dos artigos relacionados ao MES utilizam-se das tecnologias habilitadoras da I4.0 para ter suas funcionalidades contidas no seu desenvolvimento. A busca na base *Scopus* resultou em 72 trabalhos e 45 na base *Web of Science* como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Palavras-chaves ‘*Manufacturing Execution System*’ AND ‘*Industry 4.0*’



Fonte: *Web of Science* (2022)

Para conscientização do problema, seguindo a lógica do DSR, foi realizada uma revisão sistemática da literatura a partir da leitura dos artigos encontrados ao realizar o estudo bibliométrico e a seleção criteriosa dos artigos com temas relacionados ao estudado neste trabalho. Os artigos que mais se destacaram pela relevância e aderência com o tema foram descritos no Quadro 02, de acordo com o título e conteúdo que foi descrito nos resumos desses artigos listados a seguir:

Quadro 02: Seleção - Relevância e Aderência

AUTOR	TÍTULO	PALAVRAS-CHAVES	ANO
Guilherme Luz Tortorella, Eduardo Ferreira da Silva e Danieli Braun Vargas	An empirical analysis of Total Quality Management and Total Productive Maintenance in Industry 4.0	Total Quality Management, <b>Total Productive Maintenance, Industry 4.0</b> , Operational Performance Improvement	2018
Roosefert Mohan T.a , Preetha Roselyn J.a, Annie Uthra R.b , Devaraj D.c.e Umachandran K.d	Intelligent machine learning based total productive maintenance approach for achieving zero downtime in industrial machinery	<b>Industry 4.0, Total productive maintenance</b> , Condition based monitoring Predictive maintenance, Zero downtime	2021
Guilherme Luz Tortorella, Flavio S. Fogliatto d , Paulo A. Cauchick-Miguel c , Sherah Kurnia e Daniel Jurburg	Integration of Industry 4.0 technologies into Total Productive Maintenance practices	Maintenance 4.0, <b>Industry 4.0, Total productive maintenance</b> , Diffusion of innovation theory, Multiple case study	2021
Ebru Turanoglu Bekar , Anders Skoogh , Nihan Cetin e Osman Siray	Prediction of Industry 4.0's Impact on Total Productive Maintenance Using a Real Manufacturing Case	<b>Industry 4.0, Total Productive Maintenance (TPM)</b> , Key technologies of Industry 4.0 ,Impact of Industry 4.0, Conjoint analysis Prediction	2019
Indra Setiawan	Integration of Total Productive Maintenance and Industry 4.0 to increase the productivity of NC Bore machines in the Musical Instrument Industry	<b>TPM, OEE, Industry 4.0</b> , NC Bore, productivity	2021
Francisco Almada-Lobo	The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES)	<b>Industry 4.0</b> , Cyber-Physical Systems, <b>Manufacturing Execution Systems.</b>	2015
Soujanya Mantravadia e Charles Møller	An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0?	Smart factories, Manufacturing Operations Management, Enterprise Information Systems, Digital manufacturing, Digital Twin, Real-time systems, Conceptual, Review, Empirical case study, ERP software.	2019
Gianluca D'antonio, Lisa Macheda, Joel Sauza Bedolla e Paolo Chiabert	PLM-MES Integration to Support Industry 4.0	Product Lifecycle Management, <b>Manufacturing Execution Systems</b> , Information systems, <b>Industry 4.0.</b>	2018
Szilárd Jaskóá, Adrienn Skropa, Tibor Holczinger , Tibor Chovánb e János Abonyi	Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools	<b>Manufacturing execution systems (MES), Industry 4.0</b> , Ontologies Semantic models of Industry 4.0, Reference architectural model for industry 4.0 (RAMI 4.0)	2020
Soujanya Mantravadi, Andreas Dyrøy Jansson e Charles Møller	User-friendly MES Interfaces: Recommendations for an AI-based Chatbot Assistance in Industry 4.0 Shop Floors	AI Applications, Manufacturing, Chatbot	2020

Fonte: a autora (2022)

Para a segunda etapa da DSR foram propostos os objetivos deste trabalho e encontram-se descritos no Referencial Teórico. Para a terceira etapa proposta pela DSR de Projeto e Desenvolvimento, tem-se esta dissertação em andamento. Para a quinta etapa do DSR avaliação, observe e meça quão bem o artefato suporta uma solução para o problema. Esta atividade envolve a comparação dos objetivos de uma solução com os resultados reais observados do uso do artefato na demonstração (PEFFERS *et al*, 2007). Assim, este trabalho foi testado diante dos resultados encontrados na literatura e proposto no modelo heurístico.

Para Popper, o problema clássico da indução, utiliza-se do critério da verificação empírica positiva, ou seja: o resultado positivo de um confronto intencional de uma expectativa anterior. A verificação é tida apenas como uma parte de secundária importância, no processo

do raciocínio indutivo, que pressupõe que as características da realidade observada permitem expectativas maiores e mais seguras (DIAS, 2015).

A insatisfação se deu por conta de que nos modelos de implementação encontrados na literatura temos pouca ou nenhuma menção a evolução da metodologia TPM ao longo do tempo e principalmente sua interação com as tecnologias disponíveis, o que gera a questão de pesquisa discutida neste trabalho, assim com base na teoria de Popper foi desenvolvido um modelo de Implementação da Manutenção Autônoma suportado na visão de processo que é proporcionada pelo MES, tendo como base que é preciso desenvolver modelos próprios de investigação, expressos adequadamente no design da pesquisa, e avaliá-los continuamente durante o processo sob critérios que validem criticamente o desenvolvimento da mesma, verificando o rigor dos procedimentos e a confiabilidade das conclusões que não prescindem de evidências e argumentação sólida, mesmo quando predominar o método qualitativo em vista de atender às novas demandas dessa área do conhecimento (GALHARDI; BALLERINI; SILVA, 2017).

Na concepção de Popper, pode-se compreender em suas obras uma preocupação com o avanço do conhecimento científico, ao falar de progresso do conhecimento, ele não quer dizer que a ciência avança acumulando experiências perceptuais, ou seja, que a ciência progride adicionando novas experiências ao conhecimento já possuído, mas sim que o crescimento do conhecimento implica substituição de teorias científicas por outras melhores ou mais satisfatórias (DIAS, 2015).

A partir da literatura estudada é visto que para a elaboração da estratégia de implantação da manutenção autônoma nas suas sete etapas, em concordância com a supervisão de um MES, os trabalhos devem ser suportados pela equipe de educação e treinamento definindo os prazos, critérios de avaliação para cada passagem de etapa, o que normalmente deve acontecer por meio da mensuração do OEE, visto que é cabível explicitar que se o equipamento alcança as metas estabelecidas de OEE, é possível afirmar que a equipe envolvida, desde a gestão até o chão de fábrica, executaram suas tarefas com eficiência e eficácia, visto que a eficiência consiste em fazer certo desde a primeira vez, ao realizar as operações com menos recursos, pessoas, menor tempo ou orçamento.

De modo que, no modelo Heurístico de implementação da Manutenção Autônoma, suportada pelo MES, também foi proposta a avaliação da evolução com base em três níveis de maturidade, sendo que para a completude das três primeiras etapas considera-se que o colaborador esteja no nível um, onde este tem a capacidade de percepção e restauração, ou ainda, a melhora das avarias diagnosticadas, criatividade para a resolução de problemas e flexibilidade para evolução e aprendizado, para as etapas quatro e cinco, o colaborador estará

no nível dois, onde sua capacidade de descobrir o sistema de causas das anomalias mediante conhecimento das funções e estrutura do equipamento e compreender a correlação entre equipamento, qualidade do produto.

Por fim, para as duas últimas etapas seis e sete, pressupõe-se que no nível três o colaborador tenha a capacidade de padronizar as atividades relacionadas ao grupo e ao equipamento, conhece e realiza ajustes sem intervenção da manutenção, além de ofertar a equipe treinamentos avançados sobre TPM, máquina e seus componentes, sempre com respaldo da equipe de educação e treinamento e manutenção planejada.

Quadro 03: Teste da Heurística de Implantação do Pilar de Manutenção Autônoma, suportado pelo MES

Passo	I4.0	MES	
1	<b>Big Data</b>	Análise de dados coletados automaticamente	A p r e n d e r
2	<b>Computação em Nuvem e CPS</b>	Disponibilização de informações e integração de sistemas	
3	<b>Simulação e IoT</b>	Mensurar tempos limpeza, listar pontos de lubrificação por meio de sensores / Simular sistema de lubrificação	
4	<b>Digitalização, Realidade Aumentada e CPS</b>	Análise de falhas e otimização de Procedimentos	A u t o n o m i a
5	<b>Descentralização e Rastreabilidade</b>	Rastrear e controlar produtos e processos	
6	<b>M2M, Big Data e CPS</b>	Padronizar atividades, mensurar e analisar dados	
7	<b>Big Data, Computação em Nuvem, IoT</b>	Analisar Criticamente por meio do acompanhamento de indicadores MTTR, MTBF e OEE	

Fonte: a autora (2022)

No modelo descrito pela autora, o pilar de educação e treinamento aparecem como base para todos os outros e é considerado básico. Em função de suas atividades ele é o apoio dos demais pilares que influenciam diretamente a ‘Eficiência Global do Equipamento’, OEE (RIBEIRO, 2016). Este pilar busca elevar o nível de habilidades técnicas dos operadores e da liderança, além de promover a capacitação e a proatividade.

O pilar de educação e treinamento tem como meta preencher as lacunas de conhecimento necessárias para atingir os objetivos do TPM, pois é imprescindível oferecer oportunidades de treinamento e educação aos operadores, pessoal de manutenção e gerenciamento, assim ter a moral e experiência aprimorados fornecendo treinamento de *soft*

*skills* e treinamento técnico, para mensurar os conhecimentos de todos os funcionários da manutenção e após definir os treinamentos necessários, é criada uma matriz de habilidades (TURANOGLU *et al.*, 2019).

O nível de maturidade do programa TPM bem como a implantação do pilar de manutenção autônoma, pode ser avaliado por meio de um levantamento de indicadores de desempenho OEE, relacionados à eficiência geral dos equipamentos, no entanto também é válido um levantamento ou mesmo a definição de metas de MTTR e MTBF, pois como é sabido o MTBF é uma medida básica de confiabilidade do sistema e o MTTR, por outro lado, representa a eficiência das ações corretivas do processo.

Como pode ser visto, MTTR e MTBF são duas métricas de desempenho que devem ser utilizadas para aumentar o entendimento da empresa sobre o processo, o que ratifica o nível de aprendizagem e evolução da operação ao longo da passagem das etapas da Manutenção Autônoma, quanto menores vão se tornando os tempos em MTTR gradativamente haverá aumento nos tempos de MTBF conseqüentemente será maior o nível de maturidade da equipe o que significa que o aprendizado foi efetivo.

Para ratificar por meio da literatura estudada que o MES é o apoio do modelo apresentado, temos que o gerenciamento de manutenção atual, TPM, está cada vez mais seguindo o caminho da manutenção preditiva, onde a manutenção é acionada para a máquina com base em fatores de condição. Aqui, são monitorados fatores on-line como vibração, consumo de energia, produção de calor de sistemas etc. Se os limites permitidos forem excedidos, uma ordem de manutenção é liberada ou uma mensagem de aviso é fornecida no terminal da máquina (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009).

Como falado anteriormente cada uma das sete etapas da Manutenção Autônoma, exige um envolvimento com alguma área distinta da empresa o que compreende um dos oito pilares também já descritos, e esta correlação também existe com o próprio MES e da TPM no ambiente da I4.0, será ratificado e descrito essa correlação com base na literatura.

Os problemas enfrentados pelas empresas manufatureiras durante a implementação e integração de metodologias enxutas podem ser solucionados através do uso de tecnologias que fazem parte da indústria 4.0. Uma delas é o MES, que se enquadra em uma integração vertical de informações que auxilia no controle e melhoria durante os processos de redução de atividades sem valor agregado (BESUTTI; CAMPOS; CECCONELLO, 2019).

O mesmo conceito de mapeamento prévio seja de parada ou ajustes de máquina, pontos de lubrificação ou sensoriamento, será utilizado nas etapas de implementação da Manutenção Autônoma, visto que para qualquer trabalho bem sucedido no TPM é de extrema importância

à análise e coleta de dados, sendo assim, foi observado que as tecnologias inovadoras mencionadas podem gerar impactos positivos nas ferramentas conceituais do TPM, pois se trata de uma metodologia de fácil aplicação junto a outras metodologias e iniciativas tecnológicas, além disso, a associação positiva entre I4.0 e TQM e TPM aponta que eles também podem apoiar as abordagens de gestão existentes sem entrar em conflito com suas práticas e princípios subjacentes (TORTORELLA; SILVA; VARGAS, 2018).

Uma grande vantagem das tecnologias que auxiliam a engenharia de manutenção é a qualidade dos dados. Neste momento é onde se faz a ligação entre indústria 4.0 com o pilar de manutenção planejada presente na metodologia TPM (ALMEIDA; FABRO, 2019).

1º. Passo – Limpeza Inicial – Análise do panorama atual por meio do coletor de dados onde são inseridos pela produção ou coletados automaticamente, setups, manutenções, descartes de peças não conformes, para avaliação inicial de reais necessidades do equipamento ou mesmo se as maiores paradas estão relacionadas a pessoas, tais como falta de conhecimento do processo ou dos equipamentos, assim possibilitando a aplicação de ferramentas como *Kaizens*, têm-se exemplos que para a primeira etapa de Limpeza e Inicial, a equipe do pilar de Controle inicial deve-se previamente buscar os dados no MES das maiores paradas, assim será feito um mapeamento prévio das reais necessidades de limpeza, atacando os pontos com maiores tempos, assim o suporte de facilitadores como *Big Data* e *Analytics* são aliadas cruciais. Desta forma, um sistema MES suporta as atividades de melhoria em todas as fases: definir (definição dos processos a serem melhorados), medir (medir os dados do processo), analisar (análise dos dados medidos) e controlar (verificar as etapas tomadas) (KLETTI, 2007).

2º. Passo – Eliminação das fontes de contaminação e locais de difícil acesso – o MES pode mensurar os tempos gastos com limpezas ou pequenas paradas devido a acúmulos de sujeira ao longo do processo produtivo, assim auxiliar em qual local atacar primeiro por meio dos dados obtidos, o que viabiliza a aplicação da ferramenta de ECRS (Eliminar, Combinar, Reorganizar ou Simplificar), sendo uma ferramenta para identificar possíveis falhas e desperdícios dentro da empresa, ele avalia sistematicamente todos os ativos em sua cadeia produtiva que não estão agregando valor e podem ser melhoradas, os dados ficam disponíveis em rede assim a aplicação da Computação em Nuvem e dos chamados CPS se mostram benéficos. O MES quando integrado a outros sistemas permite realizar chamados para as áreas de apoio (manutenção, por exemplo), melhorando substancialmente os tempos de atendimento. Integrado ele permite a visualização em tempo real do status dos equipamentos (ALMEIDA; FABRO, 2019).

3°. Passo – Elaboração de Padrões Provisórios – O MES torna-se ferramenta facilitadora que indica se a lubrificação foi feita com o lubrificante correto, no ponto certo, com a quantidade exata, e na periodicidade adequada com implementação de sensores o que possibilita o mapeamento do sistema de lubrificação e pode ser aprimorado com auxílio de simulação. As perdas de maior impacto detectadas pelo MES devem então ser estudadas e eliminadas por meio de ferramentas como *Kaizen*, sendo ele uma ferramenta de melhoria contínua onde se concentra em atividades que terão alto impacto nos resultados com o menor esforço possível. Com a idade dos equipamentos, simulações que levam em conta apenas condições iniciais podem imprimir resultados inadequados se não levarem em consideração os dados oferecidos pelos sistemas MES (GAMA; COSTA, 2009). A camada *cyber* pode abrigar um modelo de simulação que reproduz o ambiente físico, além de incluir um conjunto de aplicações de tecnologia da informação (TI) como sistemas integrados de gestão (ERP), sistemas de acompanhamento e controle da produção (*Manufacturing Execution System – MES*), sistemas de gestão do ciclo de vida do produto (PLM), entre outros (SOUZA *et al*, 2021). O MES se torna um elemento de interface entre o operador e toda a empresa ao inserir os dados que não foram coletados automaticamente, esses dados são inseridos no chamado coletor, onde temos que o coletor é um aplicativo destinado ao apontamento de produção, paradas, setups, manutenções, chamados a áreas de apoio e diversos apontamentos realizados diretamente no ambiente fabril. Geralmente utilizado em telas de toque (*touch screens*), visando a facilidade de uso (ALMEIDA; FABRO, 2019).

4°. Passo – Inspeção Geral – A partir do 4º passo, a equipe de manutenção autônoma junto com a equipe de manutenção planejada, começam a mapear os sistemas e as perdas para priorizar os módulos de treinamento no nível de componentes de máquina, visando à transferência das atividades de MP em MA, por meio do funil de transferência de habilidades, além de implementar novos controles visuais assim os CPS, realidade aumentada e a digitalização de procedimentos aprimoram a efetividade do quarto passo com a criação de procedimentos operacionais padronizados e digitais. A realidade aumentada ou virtual permite ao usuário simular e explorar interativamente o comportamento de um sistema de produção baseado em CPS. Isso é feito por meio da recriação de um mapeamento realista dos processos de fabricação (GORECKY *et al*, 2014).

5°. Passo – Inspeção Autônoma – Neste passo a equipe irá revisar e melhorar os padrões de inspeção, limpeza e lubrificação, fortalecer o sistema de manutenção de rotina, elevar os níveis de inspeção e habilidade de restauração, visando reduzir o tempo de inspeção e assim garantir a manutenção e o controle dos padrões de inspeção autônoma. Outro aspecto positivo da

correlação TPM x MES explicita-se na quinta etapa da Manutenção Autônoma que está intrinsicamente ligada ao pilar de Manutenção da Qualidade, onde se faz uma correlação entre a capacidade de descobrir as causas das anomalias mediante conhecimento das funções e estrutura do equipamento e compreender a correlação entre equipamento e qualidade do produto, por isso a implantação de um sistema de rastreabilidade é bastante conveniente assim um MES deve ser capaz de fornecer relatórios confiáveis para diferentes grupos de usuários. Dentro do contexto de fábricas inteligente, os produtos gerados são equipados com inteligência descentralizada, podendo ser rastreados, controlados e endereçados pelo MES durante todo o processo de produção (SIEPMANN, 2016). Isso inclui relatórios de turno por área de produção para fornecer informações ao gerenciamento de produção, relatórios de interrupção para manutenção e reparo, relatórios de qualidade para garantia de qualidade e relatórios de KPIs para gestão. Esses relatórios geralmente são elaborados a médio e longo prazo e devem apoiar os trabalhadores em seu trabalho diário (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009).

6°. Passo – Padronização – A padronização de processos industriais visa organizar os processos de produção para otimizar a qualidade, gerar competitividade e, assim, aumentar os lucros. O MES conta com módulos que permitem a criação desses fluxos de maneira eletrônica, assim o histórico das falhas e tipos das falhas serve para melhorias nos planos de manutenção. A padronização de processos garante a melhoria contínua durante a sexta etapa de manutenção autônoma, o que garante a execução das atividades para que ocorreram sempre da mesma forma com o apoio do MES e suas ferramentas de monitoramento e análise de sucata, bem como rastreamento de atividade de retrabalho, assim *Machine to Machine* (M2M) é um conceito que descreve qualquer tecnologia que permite que dispositivos em rede troquem informações e executem ações sem qualquer intervenção manual de humanos, o que promove maior padronização no ambiente produtivo tanto no modo digital como no físico. O departamento de manutenção recebe relatórios de manutenção e é notificado nos casos em que os limites de uso são excedidos. As datas de vencimento dos trabalhos de manutenção existentes para máquinas e recursos são visualizadas em um plano de manutenção. Além disso, o departamento recebe relatórios sobre interrupções em máquinas ou instalações e paradas, bem como a implementação de resolução de interrupções (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009). Qualquer falha, uma vez registrada, pode gerar imediatamente um fluxo de trabalho no sistema MES no qual as etapas de processamento (como, por exemplo, no relatório 8D) são especificadas e os departamentos que processam as etapas são definidos. Todas as ações a serem realizadas durante o processamento são então inseridas em uma máscara para rastreamento de ações e podem, assim, ser monitoradas de forma transparente (KLETTI, 2007).

7°. Passo – Gestão autônoma – Para a sétima e última etapa da Manutenção autônoma, espera-se que os colaboradores já tenham alcançado autonomia na tomada de decisões principalmente por esta etapa ser acompanhada de perto pelo pilar de manutenção planejada, assim as ações são tomadas de forma mais rápida e eficaz, compreende em manter o equipamento em excelentes condições, ter comprometimento em cumprir as metas de zero quebra, zero acidente e zero defeito, onde o papel do MES é de grande importância na Gestão da manutenção como manutenção e assistência planejamento e implementação de medidas adequadas para permitir que as máquinas e instalações cumpram os seus objetivos de desempenho (KLETTI, 2007).

O MES proporciona a visibilidade necessária para entender e melhorar o processo de produção, os gráficos gerados por meios dos dados coletados e armazenados durante todo o tempo de atividade, são analisados e comparados com as metas estabelecidas, nesta etapa da manutenção a equipe terá maturidade para correlacionar à evolução de MTTR, MTBF e OEE com a aplicação da metodologia TPM.

Ao condensar a imensa quantidade de informações detalhadas contidas em um MES é possível gerar informações gerenciais que refletem a situação técnica e que também permitem tirar conclusões sobre potenciais de melhoria, como, por exemplo, o índice OEE para recursos operacionais individuais, departamentos inteiros ou mesmo fábricas inteiras (KLETTI, 2007).

Para a motivação dos funcionários que é necessária para atingir uma meta, um MES pode ser introduzido quase sem despesas extras. O monitoramento componente de visualização em particular constitui um veículo adequado. A meta definida é, por exemplo, “melhoria da documentação de quebra de máquina”.

A exibição do grau de documentação existente no terminal MES da máquina pode levar os trabalhadores a informar o motivo da avaria (MEYER; FUCHS; THIEL, 2009), o que vai de encontro com as metas estabelecidas pelo TPM no pilar de manutenção autônoma, com propósito de eliminar perdas geradas ao longo das atividades e processos e melhorar de forma contínua os processos produtivos, principalmente as perdas geradas por fatores, como quebras, pequenas paradas, redução da velocidade e defeitos de qualidade e retrabalhos.

O principal objetivo de implementação deste modelo é melhorar as competências dos trabalhadores e técnicos no desenvolvimento de programas de TPM. Para isso, é necessário determinar os conhecimentos, habilidades, aptidões e níveis de competência dos trabalhadores, por meio da matriz de habilidades, que consiste num mecanismo para mapear as competências/habilidades necessárias e desejadas para que um funcionário possa desempenhar

suas funções e tentar atingir os objetivos e metas estabelecidos, uma vez a atividade transferida, os operadores treinados passam a serem multiplicadores.

As pessoas precisam fazer parte do processo de mudança, ativamente envolvidas nas decisões e capaz de influenciar o resultado. Se tratados com respeito, eles ganham reconhecimento e autoestima e uma comunicação de mão dupla resultará (WILLMOTT; MCCARTHY, 2001).

A partir da correlação e união das metodologias MES e TPM, a presente pesquisa entrega uma proposta de modelo de maturidade alinhado aos princípios estudados concernentes à I4.0. Os resultados da aplicação do TPM podem ser medidos, ainda que estes sejam frutos dos resultados imensuráveis, tais como a motivação e maior conhecimento gerado ao longo da introdução da metodologia no dia a dia das empresas e de seus colaboradores.

Com base em estudos prévios da aplicação dos conceitos do TPM apresentados ao longo deste trabalho, esta pesquisa tem como objetivo identificar e apresentar os níveis de maturidade a partir das perspectivas das indústrias manufatureiras e de seus colaboradores.

Segundo Maasouman e Demirli (2016), um dos objetivos da proposição de um novo modelo de maturidade é mensurar o nivelamento atual de uma organização para que posteriormente se possa aprimorar os processos de manufatura.

Com qualquer modelo de maturidade baseado em níveis de maturidade, sempre há a questão de quanto tempo levará para completar um determinado nível de maturidade. A resposta é dependente de quanto tempo leva para adquirir o conhecimento necessário para aquele nível (KERZNER, 2001).

Os modelos de maturidade foram desenvolvidos em resposta à necessidade de medir o progresso alcançado pela organização como resultado da melhoria contínua, A utilidade dos modelos de maturidade organizacional está na tentativa de sistematizar todas as áreas e processos existentes em uma organização madura, estabelecendo critérios precisos para atingir diferentes níveis de maturidade em cada área, também como recomendação de métodos e técnicas, as chamadas “melhores práticas”, para determinados níveis (KOSIERADZKA, 2017).

Segundo explica o autor Nakajima (1988), se as metas de pequenos grupos são as mesmas que as metas da empresa, podemos avaliar seu progresso medindo o grau em que as atividades em grupo contribuem para o cumprimento das metas da empresa. Portanto, é muito importante que se estabeleça uma gestão verdadeiramente participativa, assim como expandir o papel dos colaboradores dentro das organizações, dando-lhe maior autonomia, sendo uma forma de garantir que o trabalho seja eficaz e atenda às expectativas estabelecidas, assim com o ter responsabilidade pelas metas gerais da empresa, pois este método centra-se nas relações

das equipes, tanto internamente quanto externamente aos locais de trabalho, ou seja, no Gemba, quando aplicado à manufatura, significa o lugar na fábrica onde as coisas realmente acontecem.

O alcance da maturidade desejada ao longo das etapas é uma responsabilidade tanto da gestão quanto do próprio colaborador, ainda assim é primordial que a gestão forneça os treinamentos adequados em cada etapa de desenvolvimento da metodologia, assim desenvolver um trabalhador capacitado e motivado, transformando pequenas equipes em grupos semiautônomos. A Gestão também tem a responsabilidade de proporcionar um bom ambiente de trabalho físico e psicológico aos trabalhadores, isso requer uma gestão altamente participativa.

A presente proposta envolve um total de 3 níveis de maturidade divididos em dois momentos que caracterizam a evolução do entendimento dos processos ao longo da evolução nos passos da metodologia TPM, conforme Quadro 4:

Quadro 04: Proposta de Modelo de Maturidade na Metodologia TPM

Passo	Nível de Maturidade	
1	Nível 1 = Capacidade de percepção e restauração ou ainda a melhorara das avarias diagnosticadas, criatividade e flexibilidade.	A p r e n d e r
2		
3		
4	Nível 2 = Capacidade de descobrir o sistema de causas das anomalias mediante conhecimento das funções e estrutura do equipamento e compreender a correlação entre equipamento, qualidade do produto	A u t o n o m i a
5		
6	Nível 3 = Capacidade de padronizar as atividades relacionadas ao grupo e ao equipamento, conhece e realiza ajustes sem intervenção da manutenção, além de ofertar a equipe treinamentos avançados sobre TPM, máquina e seus componentes.	
7		

Fonte: a autora (2022)

O Nível 01 corresponde ao momento de aprendizado por parte do time interno acerca das práticas de diagnóstico, avaliação e pré-planejamento de ações que visem aprimorar os indicadores da organização. Ainda nesse primeiro nível, é viável a partir de condutas de percepção de avarias a restauração de processos e ações que tenham bom desempenho. Nessa etapa, a flexibilidade é bem-vinda, pois ela dá vazão a melhorias oriundas de racionalizações criativas do cenário presente. Sendo importante ressaltar a utilização de métricas de desempenho, que de acordo com Karim e Zaman (2013), possuem a prerrogativa de para avaliar e mapear os objetivos da organização. Para tanto, a Implementação contínua dos modelos estatísticos para garantia de confiabilidade e planejamento coerente das ações de melhoria (Implementação contínua dos modelos estatísticos para garantia de confiabilidade e planejamento coerente de ações de melhoria (DEAL; KENNEDY, 2018).

Os dois níveis seguintes envolvem uma fase de desenvolvimento de controle e autonomia pelos *stakeholders* que venham a aderir à proposta de modelo, já que a fase de aprendizado traz reflexões e treinamento empírico relevante para o desenvolvimento das habilidades de avaliação dos processos. Implementação de análises feitas por especialistas com foco em: prazos, clareza; integralidade e feedbacks (SORIANO-MEIER; FORRESTER, 2002).

O Nível 02 do modelo proposto se aprofunda na capacidade de descoberta de sistemas que estão aquém da plena eficiência, devido a inconformidades em suas estruturas e/ou inadequada aplicação de suas funções. Esse é o momento em que se aprimora um dos principais elementos presentes em modelos de maturidades de diversos autores: clareza. Conceito esse que aplicado a modelos de maturidade promovem compreensão dos processos e eficiência de equiparação de resultados (CMMI, 2002).

Finalmente o Nível 03 do modelo de maturidade presente alcança a padronização de ações que promovem a melhor eficiência dos recursos humanos e tecnológicos, pois já se conquistou neste momento, um patamar de reconhecimento dos processos, seus resultados, e eventuais respostas positivas. Um resultado que vai à direção do contexto trazido por Ceconello e Rodrigues (2021) ao descreverem que todo modelo de maturidade possui eixos que se correlacionam com fatores envolvidos nos processos da organização, pois deve haver sinergia entre os departamentos. Nesse ínterim, o acionamento de equipes de manutenção se torna cada vez menos frequente, na medida em que há condutas e fluxos de atividades definidos para os eventos adversos. Nessa etapa, ainda se estabelece a prática de treinamentos vitalícios aos setores produtivos acerca de TPM, maquinário e seus elementos. Dessa forma, encontra-se o resultado em eficiência dos recursos e engajamento do time a partir da confiança no método (MARVEL; STANDRIDGE, 2009).

Com a aplicação dos facilitadores da I4.0 proporcionada pelo MES, juntamente com a metodologia TPM, as tomadas de decisão serão cada vez mais rápidas e assertivas, uma vez que todos os ativos da empresa estarão conectados e as informações estarão disponíveis em tempo real, onde muitos benefícios são consequências desta conexão, tais como: redução de custos, aumento da segurança, conservação ambiental, redução de erros, redução significativa do desperdício, seja de matéria prima ou mesmo de tempo, transparência nos negócios, aumento da qualidade de vida, customização, economia de energia, e o que se deve considerar como ganho principal, o conhecimento gerado a todos os envolvidos, assim como o desenvolvimento técnico da equipe de produção, onde se obtém ganhos mensuráveis e constantes e ainda os imensuráveis com o engajamento de uma equipe bem qualificada.

Os conhecimentos e habilidades dos envolvidos estão em contínua evolução ao longo do tempo, por meio da aplicação do TPM na rotina diária de trabalho, assim o MES torna-se uma ferramenta importante ou mesmo uma solução, pois é o primeiro a identificar os problemas que precisam ser resolvidos, além do histórico dos desvios e, em seguida, quantificar o benefício derivado da resolução dessa necessidade. Para o MES, esse benefício é o resultado da solução de problemas de fabricação, abordando riscos ou criando uma vantagem competitiva para crescer ou manter o negócio.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais considerações a que o estudo chegou, no cenário competitivo atual, é que há uma grande pressão sobre todas as indústrias de manufatura para reduzir os custos e oferecer produtos novos e de alta qualidade, com menor tempo de fabricação no mercado mundial cada dia mais customizado, com o TPM as organizações obtêm menores tempos de setup e de paradas indesejadas e a participação de seus funcionários em atividades que agregam valor e disponibilização de produtos em menor tempo, com a qualidade exigida pelos clientes.

Diante do contexto apresentado ao longo dos capítulos que compuseram esta dissertação, verificou-se que os tópicos analisados TPM, MES e a I4.0 se complementam, onde o conhecimento humano é desenvolvido por meio de um processo relacionado à eliminação de tentativa e erro, promovendo a assertividade nas ações, onde a motivação dos funcionários se torna parte integrante da estratégia da organização, e os profissionais executam tarefas inerentes à organização, apoiado pelas tecnologias da Industria 4.0.

As tecnologias habilitadoras da I4.0 estão intrinsicamente ligadas aos sete passos da Manutenção autônoma, tendo-as como aliadas fundamentais para a modernização e otimização do processo produtivo por meio de uma coleta de dados eficiente e confiável, onde temos que na Heurística proposta, há uma melhor percepção sobre a correlação entre equipamento, qualidade e produto. Todos esses fatores resultam em uma mudança na cultura da organização, que é o benefício mais importante, pois tem impacto de longo prazo e envolve os ativos da empresa, como máquinas e pessoas, entretanto, a maturidade na metodologia TPM é um processo em constante evolução.

A Heurística proposta para a Implantação do Pilar de Manutenção Autônoma, suportado pelo MES foi testada com base na literatura estudada e na Teoria de Popper, assim como os níveis de maturidade da Metodologia TPM, com a implantação do pilar de manutenção autônoma, visto que com base na literatura, pode ser avaliado por meio de um levantamento de indicadores mensurados pelo MES, sendo este uma tecnologia facilitadora da I4.0, assim recomenda-se para trabalhos futuros a verificação de aplicação empírica da heurística apresentada, assim como o modelo de maturidade para o aperfeiçoamento do estudo, pois este tema se mostrou bastante relevante diante da pesquisa apresentada, identificaram-se questões correlatas que permitiriam o desenvolvimento de outros estudos para ampliar o entendimento do fenômeno estudado, ou para buscar confirmação empírica dos resultados obtidos, no modelo de maturidade proposto podemos comentar que a maturidade na gestão do TPM é um processo

em constante evolução, a contribuição do modelo apresentado permitir uma visão ideal desta maturidade, no entanto permite a personalização para que cada empresa possa ter uma definição diferente de maturidade conforme suas metas, objetivos a principalmente sobre a equipe envolvida.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHUJA, K. Total productive maintenance: literature review and directions. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, nº 07, p.709-756, 1 Agosto 2008.

ALMADA-LOBO, F. The industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). **Journal of Innovation Management**, v. 03, nº 04. 2015, pp.16-45. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/306150248\\_The\\_Industry\\_40\\_revolution\\_and\\_the\\_future\\_of\\_Manufacturing\\_Execution\\_Systems\\_MES](https://www.researchgate.net/publication/306150248_The_Industry_40_revolution_and_the_future_of_Manufacturing_Execution_Systems_MES). Acesso em 07/01/2022.

ALMEIDA, G.A.; FABRO, E. Indústria 4.0 como ferramenta na engenharia de manutenção com base na metodologia TPM. **Scientia cum Indústria**, v. 07, nº 02. 2019, pp.14-16. Disponível em: <http://www.ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/6840/pdf#>. Acesso em 07/01/2022.

ALVES-MAZZOTTI, A.J; GEWANDSZNAJDER, F. **O método nas ciências naturais e sociais: pesquisa quantitativa e qualitativa**. 2. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

BESUTTI CAMPOS, V.D; CECCONELLO, A. Development of an open source-based manufacturing execution system (MES): industry 4.0 enabling technology for small and medium-sized enterprises. **Sinetia cum Industria**, v. 07, nº 02, novembro, 2019.

BONA, G.; CESAROTTI, V.; ARCESE, G.; GALLO, T. Implementation of Industry 4.0 technology: New opportunities and challenges for maintenance strategy. **Procedia Computer Science**, v. 180, p. 424-429, janeiro 2021.

BORLIDO, D.J.A. **Indústria 4.0 – Aplicação a Sistemas de Manutenção**. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. 2017. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/102740>. Acesso em 07/01/2022.

CECCONELLO, I.E.; RODRIGUES, L. Avaliação da Maturidade Lean em uma Célula de Manufatura. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA**, V. 9, N. 1, PP. 44 — 55, 2021. Disponível em: <http://www.ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/9966>. Acesso em 05/05/2022.

CHEN NOPHUT, C.; VOIGT, C. A model-driven approach for engineering customizable MES with the application to the food and beverage industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, nº 115., p. 2607-2622, mar. 2021.

CHEN, V. Implementation of the Manufacturing Execution System in the food and beverage industry. **Journal of Food Engineering, Freising**, v. 278, pp.109-932, ago. 2020.

CMMI. “Capability Maturity Model® Integration (CMMI SM), Version 1.1. CMMI for Systems Engineering, Software Engineering, Integrated Product and Process Development, and Supplier Sourcing” (CMMI- SE/SW/IPPD/SS, V1. 1), 2002.

COTTYN, J.; et al. A method to align a manufacturing execution system with Lean objectives. **International Journal of Production Research**, v. 49, nº 14, pp. 4397-4413, 2011.

CRUZ, C.; RIBEIRO, U. **Metodologia científica: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil, 2003.

D’ANTONIO, G.; MACHEDA, L.; BEDOLLA, J.S.; CHIABERT, P. PLM-MES Integration to Support Industry 4.0. **14ª IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM)**. Sevilha, pp. 129-137, julho. 2017.

DIAS, E.A. Progresso científico e verdade em Popper. **Trans/Form/Ação: Revista de Filosofia**, Marília, v. 38, nº 02. 2015, pp.163-174. Disponível em: <https://revistas.marilia.unesp.br/index.php/transformacao/article/view/5238>. Acesso em 10/03/2022.

DÍAZ, J.R.R; GARCÍA, J.L.A; MARTÍNEZ, V.L. **Impact Analysis of Total Productive Maintenance - Critical Success Factors and Benefits**. Suíça: Springer, 2019.

DUARTE, J.C; CUNHA, P.; CRAVEIRO, J. *Maintenance database. Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013*. Setúbal: Elsevier B.V., 2013.

DRESCH, A.; VEIT, D.R.; LIMA, P.N.; LACERDA, D.P.; COLLATTO, D.C. *Inducing Brazilian manufacturing SMEs productivity with Lean tools. International Journal of Productivity and Performance Management*, v. 68, nº 01, pp.69-87, January 2019.

DRESCH, A.; LACERDA, D.P.; ANTUNES JR, J.A.V. *Design Science Research - Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia*. Porto Alegre: Bookman. 2015, p.741. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/3CZmL4JJxLmxCv6b3pnQ8pq/?lang=pt>. Acesso em 10/03/22.

DRESCH. *Design Science e Design Science Research como Artefatos Metodológicos para Engenharia de Produção*. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, 2013.

FILIPOV, P. Manufacturing Operations Management -The Smart Backbone of Industry 4.0. *International Scientific Journal Industry 4.0*, v. 01, pp. 19-24, dezembro 2016.

FURLAN, E.; LEÃO, M.S. *Manutenção Autônoma: Um Estudo de Caso em Uma empresa de Embalagens Cartonadas*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade Cenecista De Capivari-SP, Capivari, 2010.

GALHARDI, A.C.; BALLERINI, S. Conceitos de Karl Popper aplicados a pesquisas em engenharia de produção. *XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - A Engenharia de Produção e as novas tecnologias produtivas: indústria 4.0, manufatura aditiva e outras abordagens*. Joinville, SC, Brasil. 2017, pp.04-05. Disponível em: <https://docplayer.com.br/145534599-Conceitos-de-karl-popper-aplicados-a-pesquisas-em-engenharia-de-producao.html>. Acesso em 07/03/2022.

GAMA, B.D; COSTA, M.A.B.D. Benefícios obtidos com a integração dos sistemas MES e a manufatura digital do PLM. *XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção: A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão*. Salvador, outubro 2009, p.08. Disponível em:

[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009\\_tn\\_sto\\_091\\_621\\_13395.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_sto_091_621_13395.pdf). Acesso em 07/03/2022.

GARCIA, S. **Gestão 4.0 em tempos de disrupção**. São Paulo: Blucher. 2020, pp.49-50. Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/download-pdf/455>. Acesso em 07/03/2022.

GIL, A.C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOECKY, D.; SCHMITT, M.; LOSKYLL, M.; ZÜHLKE, D. Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era. **12<sup>a</sup> IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**. 2014.

GRAF. *Industrie 4.0 - Gesamtkonzept: Zusammenspiel von intelligenten Infrastrukturen, Paradigmen and technologischen Komponenten*. In: ROTH, Einführung und Umsetzung von. **Industrie 4.0**. Heidelberg Berlin: Springer Gabler, 2016.

HANSEN, R.C. **Overall equipment effectiveness: a powerful productiod maintenance tool for increased profits**. New York: Industrial Press Inc. 2001.

SORIANO-MEIER, H.; FORRESTER, P. "A model for evaluating the degree of leanness of manufacturing firms." **Integrated Manufacturing System**, v. 13, n. 2, p. 104-110, 2002.

JASKÓ, A.; SKROPA, A.; HOLCZINGER, T.; CHOVÁNB, T.; ABONVI, J.; Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools. **Computers in Industry**, v. 123, pp. 103-300, dezembro 2020.

KANTI, A.; CUDNEY, E.A. Total productive maintenance. **Total Quality Management & Business Excellence**, 2018.

KARIM, A.; UZ-ZAMAN, K.A. "A methodology for effective implementation of lean strategies and its performance evaluation in manufacturing organizations". **Business Process Management Journal**, p. 169-196, 2013.

KERZNER, H. **Strategic planning for project management using a project management maturity model**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

KHAN, F.; FARNSWORTH, M.; MCWILLIAM, R.; ERKOYUNCU, J. On the requirements of digital twin-driven autonomous maintenance. **Annual Reviews in Control**, v. 50, pp.13-28, august 2020.

KLETTI. **Manufacturing Execution Systems – MES**. Berlim, Heidelberg: Springer, v. 01, pp.35-13, 2007.

KLEINEMEIER, M. Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungsnetzwerken. In: BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL, M.; VOGEL-HEUSER, B. **Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung Technologien**. Migration: Springer Wiesbaden, 2014.

KOSIERADZKA, A. Maturity Model for Production Management. **Procedia Engineering**, Warsaw, Poland, 22 June. pp. 342-349, 2017.

MANTRAVADIA, S.; MØLLER, C. An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0? **14<sup>o</sup> Global Congress on Manufacturing and Management (GCMM-2018)**, pp. 588-595, Aalborg, 2019.

MARCONI, M.; LAKATOS, E.M. **Metodologia científica**. 5. ed. Vol. 04. São Paulo: Atlas, 2010.

MESA. MES Explained: A High-Level View. White Paper Number 06, **Manufacturing Enterprise Solutions Association**, Pittsburgh. 1997, p.15. Disponível em: <http://alvarestech.com/temp/smar/www.delt.ufmg.br/seixas/PaginaII/Download/DownloadFiles/pap6.pdf>. Acesso em 07/03/2022.

MEYER, H.; FUCHS, F.; THIEL, K. **Manufacturing Execution Systems (MES): Optimal Design, Planning, and Deployment**. [S.l.]: McGraw Hill Professional. 2009, pp.16-30. Disponível em:

[https://books.google.com.br/books?id=M4hK1c9VibQC&printsec=copyright&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=M4hK1c9VibQC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). Acesso em 07/01/22.

MAASOUMAN, M.A.; DEMIRLI, K. “Development of a lean maturity model for operational level planning.” **Int J Adv Manuf Technol**, v. 83, p. 1171– 1188, 2016.

MOHAN, T.R; ROSELYN, J.; UTHRA, R.; DEVARAJ, D.; UMACHANDRAN, K. Intelligent machine learning based total productive maintenance approach for achieving zero downtime in industrial machinery. **Computers & Industrial Engineering**, v. 157, p. 26, julho 2021.

MULLET, V.; SONDI, P.; RAMAT, E. A Review of Cybersecurity Guidelines for Manufacturing Factories in Industry 4.0. **IEEE Access**. Fevereiro de 2021, p.23261. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/9312710/09345803.pdf>. Acesso em 07/01/2022.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM - Total Productive Maintenance**. Vol. 1. Portland: Productivity Press, 1988.

NEVES, J.M.S. **Contribuições da implantação da tecnologia de informação MES – Manufacturing Execution System – para a melhoria das dimensões competitivas da manufatura – estudo de caso Novelis Brasil Ltda**. Guaratinguetá, 2011, p. 64. Disponível em:

[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/106395/neves\\_jms\\_dr\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/106395/neves_jms_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em 07/01/22.

OLIVEIRA, C.C.; MARTINS, R.; XAVIER, A.A.P. Aplicação da Manutenção Produtiva Total (TPM): estudo de caso em uma Indústria Alimentícia. In: **16ª Simpósio de Engenharia de Produção**. Botucatu, 2009.

ÖZTÜRK, D. Technological Transformation of Manufacturing by Smart Factory Vision: Industry 4.0. **International Journal of Development Research**, v. 07, nº 11, pp. 17371-17382, novembro 2017.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M.; CHATTERJEE, S. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n° 03, pp. 45-77, 2007.

POPPER, K. **In search of a better world: Lectures and essays from thirty years**. 2. ed. London: Routledge, 1994.

POPPER, K. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix, 2001.

RAO, M.; LYNCH, L.; COADY, J.; TOAL, D.; NEWE, T. Integration of an MES and AIV Using a LabVIEW Middleware Scheduler Suitable for Use in Industry 4.0 Applications. **Applied Sciences**, pp.15-36, outubro 2020.

RAPOSO, C.D.F. Overall Equipment Effectiveness: aplicação em uma empresa do setor de bebidas do pólo industrial de Manaus. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.11, pp. 648-667, jul./set. 2011.

RIBEIRO, C.R. **Processo de Implementação da Manutenção Produtiva Total (T.P.M.) na Indústria Brasileira**. Monografia (Especialização) - Universidade de Taubaté, Taubaté. 2003, p.29. Disponível em: [https://dadospdf.com/download/ribeiro-celso-ricardo-\\_5ae5fef6b7d7bcf438f7d072\\_pdf](https://dadospdf.com/download/ribeiro-celso-ricardo-_5ae5fef6b7d7bcf438f7d072_pdf). Acesso em 07/01/2022.

RIBEIRO, H. **Manutenção Produtiva Total. A Bíblia do TPM**. Santa Cruz do Rio Pardo, SP: Viena, 2014.

RIBEIRO, H. **TPM – Os cinco passos para uma implantação de sucesso**. São Caetano do Sul: PDCA Editora. 2016, pp.14-18. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/tpm-os-5-passos-para-uma-implantacao-de-sucesso-pdf-pdf-free.html>. Acesso em 07/01/2022.

RIBEIRO, H. **O pilar de Manutenção Autônoma: Como fazer do operador o “dono do equipamento”**. PDCA, 2017.

RIBEIRO, H. **TPM - Entrevista com Haroldo Ribeiro – Metodologia de Implantação do TPM**. *Youtube*. Publicado em 2018. Disponível em:

[https://www.youtube.com/watch?v=0uXxz\\_ndjSU&ab\\_channel=HaroldoRibeiro](https://www.youtube.com/watch?v=0uXxz_ndjSU&ab_channel=HaroldoRibeiro). Acesso em 07/01/2022.

ROTH, A. *Indústria 4.0 – Hype oder Revolution?* In: ROTH, *Einführung und Umsetzung von. **Industrie 4.0.*** Heidelberg, Berlin: Springer Gabler, 2016.

RÜßMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; ENGEL, P.; HARNISCH, M.; JUSTUS, J. *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries.* **Boston Consulting Group**, 09 abril 2015, *in site*. Disponível em: [https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries](https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries). Acesso em 07/01/2022.

SALIM, R.K; RAMESHKUMAR, G.R. *Optimization of Overall Equipment Effectiveness Through Total Productive Maintenance Perspective – A Case Study.* **International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering**, vol. 07, nº 01, January. 2016, p.05. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/pilar-Manuten%C3%A7%C3%A3o-Aut%C3%B4noma-equipamento-Collection-ebook/dp/B071X3BKJ1#:~:text=O%20livro%20detalha%20as%20sete,de%20at%C3%A9%20fazer%20pequenos%20reparos>. Acesso em 07/01/2022.

SANDRINI, G. *Manutenção Autônoma: entenda os sete passos desse pilar do TPM.* **Blog da KIMIA.** Publicado em 25/04/2021, *in site*. Disponível em: <https://www.kimia.com.br/manutencao-autonoma-7-passos-pilar-tpm/>. Acesso em 07/01/2022.

SETIAWAN, I. *Integration of Total Productive Maintenance and Industry 4.0 to increase the productivity of NC Bore machines in the Musical Instrument Industry.* **Conference: Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.** Singapore, 2021.

SHARMA, S.; RASTOGI, T. *The impact of total productive maintenance on key performance indicators (PQCDSM): a case study of automobile manufacturing sector.* **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 24, nº 02, pp. 267-283, janeiro 2018.

SCHÖNING, D. Data Mining und Analyse. In: BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL, M.; VOGEL-HEUSER, B. **Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien.** Migration: Springer Vieweg, 2014.

SCHLICK, J.; STEPHAN, P.; LOSKYLL, M.; LAPP, D. Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL, M.; VOGEL-HEUSER, B. **Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien,** Migration. Springer Vieweg, 2014.

SIEPMANN, D. Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: ROTH, A. **Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0.** Heidelberg, Berlin: Springer Gabler, 2016.

SOUZA, K.; NASCIMENTO, I.; KEINE, S.; FLEIG, R. Desenvolvimento de um sistema de execução de manufatura (MES) no planejamento e controle de produção: uma aplicação da Indústria 4.0 no processo de fabricação de tubos de aço. **Produto & Produção**, vol. 22, nº 01, pp. 25-44, 2021.

SOUZA, O.; NEVES, J.M.S.D. Produção científica da utilização do MES – “Manufacturing Execution System” e do TPM – “Total Productive Maintenance” na manufatura. **XV Simpósio dos Programas de Mestrado Profissional Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa.** São Paulo, 11 a 12 novembro 2020, p.921. Disponível em: <http://www.pos.cps.sp.gov.br/files/artigo/file/954/8b2f830a2ab6f168a523c39d71156743.pdf>. Acesso em 07/02/2022.

TORTORELLA, L.; FOGLIATTO, F.S.; CAUCHICK-MIGUEL, P.A.; KURNIA, S.; JURBURG, D. Integration of Industry 4.0 technologies into Total Productive Maintenance practices. **International Journal of Production Economics**, v. 240, nº 108224, outubro 2021.

DEAL, A.; KENNEDY, T. **“Corporate Cultures”.** 5.ed. Londres: Penguin, 2018.

TORTORELLA, G.L.; SILVA, F.; VARGAS, B. An empirical analysis of Total Quality Management and Total Productive Maintenance in Industry 4.0. **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.** Pretoria / Johannesburg, South África. 2018, p.743. Disponível em: <http://ieomsociety.org/southafrica2018/papers/186.pdf>. Acesso em 07/02/2022.

TURANOGLU, B.B.; SKOOGH, A.; CETIN, N.; SIRAY, O. Prediction of Industry 4.0's Impact on Total Productive Maintenance Using a Real Manufacturing Case. In: DURAKBASA, M.D.; GENÇYILMAZ, M.G. **Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018**. Switzerland: Springer, 2019.

WERKEMA, C. **Lean Seis Sigma - Introdução às Ferramentas do Lean Manufacturing**. 2. ed. Vol. 4. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2012.

WILLMOTT, P.; MCCARTHY, M. **TPM - A Route to World-Class**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.