

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANALISE DA CONTRIBUIÇÃO E SUPORTE DA MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL PARA  
A INDÚSTRIA 4.0 NA FABRICAÇÃO MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**LAURO JOSÉ DÓRIA ORSELLI**

RIO GRANDE, RS

2024

**LAURO JOSÉ DÓRIA ORSELLI**

**ANALISE DA CONTRIBUIÇÃO E SUPORTE DA MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL PARA  
A INDÚSTRIA 4.0 NA FABRICAÇÃO MECÂNICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Leonardo de Carvalho Gomes.

Coorientador: Prof. Dr. Ismael Cristofer Baierle.

RIO GRANDE, RS

2024

### Ficha Catalográfica

O76p Orselli, Lauro José Dória.  
Análise da contribuição e suporte da manutenção produtiva total para a indústria 4.0 na fabricação mecânica / Lauro José Dória Orselli. – 2024.  
99 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2024.  
Orientador: Dr. Leonardo de Carvalho Gomes.  
Coorientador: Dr. Ismael Cristofer Baierle.

1. TPM 2. Fabricação mecânica 3. Manutenção 4. Indústria 4.0  
I. Gomes, Leonardo de Carvalho II. Baierle, Ismael Cristofer III.  
Título.

CDU 621



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**  
**PPGEMec**



Ata nº **13/2024** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dezesseis dia do mês de agosto de dois mil e vinte e quatro, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quinze horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **LAURO JOSÉ DÓRIA ORSELLI**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO E SUPORTE DA MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL PARA A INDÚSTRIA 4.0 NA FABRICAÇÃO MECÂNICA**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Leonardo de Carvalho Gomes, Luciano Volcanoglo Biehl e o convidado Lucas Schmidt Goecks sob a presidência do Professor, Leonardo de Carvalho Gomes. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Leonardo de Carvalho Gomes: APROVADO
2. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
3. Lucas Schmidt Goecks: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1.  Documento assinado digitalmente  
**LEONARDO DE CARVALHO GOMES**  
Data: 16/08/2024 15:16:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>  
CPF: 885.669.350-04
2.  Documento assinado digitalmente  
**LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL**  
Data: 16/08/2024 16:47:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>  
CPF: 575.195.100-00
3.  Documento assinado digitalmente  
**LUCAS SCHMIDT GOECKS**  
Data: 16/08/2024 15:23:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>  
CPF: 007.593.150-86

Lauro José Dória Orselli: \_\_\_\_\_

*Dedico este trabalho à minha família, que acreditou e que sempre esteve ao meu lado, me ajudando a alcançar meus objetivos!”.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Mariza Paiva Dória Orselli e Álvaro Dória Orselli que sempre apoiaram minhas escolhas, e nunca mediram esforços para fornecer as condições que eu pudesse evoluir e desenvolver os meus conhecimentos.

Aos meus familiares, especialmente aos meus irmãos Álvaro, Estela, Sara e Carolina, que são referências de dedicação e companheirismo. E a Neide Santana, querida e cuidadosa com todos nós.

Aos meus padrinhos, Dra. Elisa Pinheiro Mendonça e Dr. Álvaro Pinheiro Mendonça, que me acolheram, me apoiaram e possibilitaram o enriquecimento de conhecimento e sempre serão umas das minhas referências.

A Roberta Daoud Orselli, minha esposa e a Bernardo Daoud Orselli, meu filho, que me incentivam diariamente a entregar o melhor de mim, que sempre estão ao meu lado em todos os momentos.

A FURG por me acolher e possibilitar meu crescimento pessoal e profissional, em especial às pessoas que elevam o nome da Universidade, professores, servidores e colegas.

A Escola de Engenharia e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por me auxiliarem ao máximo na jornada de seus acadêmicos, sendo referências na FURG e motivo de orgulho a todos que passaram e passam por suas salas de aulas e corredores.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Leonardo de Carvalho Gomes e Prof. Dr. Ismael Cristofer Baierle, pelos ensinamentos e direcionamentos ao longo de todo o programa, em especial no desenvolvimento da presente pesquisa.

Aos Professores Doutores Christiane Saraiva Ogrodowski e Luciano Maciel Ribeiro, que acreditaram no meu potencial, a quem tenho profunda admiração e respeito, serei sempre grato pela oportunidade.

As empresas que fiz contato, e que entenderam o foco da pesquisa, vislumbraram que a gestão da manutenção pode ser um diferencial para as práticas das empresas e que podem gerar retorno.

## RESUMO

O surgimento e a evolução das tecnologias digitais, na chamada 4ª Revolução Industrial (I4.0), tornaram os processos produtivos (fabricação mecânica) e a interatividade entre todos os processos nas empresas mais ágeis. Porém, a dependência dessas novas tecnologias digitais também aumentou, gerando uma necessidade de manter os sistemas confiáveis a ponto de não falharem e comprometerem todo o funcionamento da empresa. A aplicação de uma gestão da manutenção nas tecnologias estruturantes da Indústria 4.0, visa identificar e detectar as condições operacionais dos componentes, mitigar as falhas e desta forma melhorar a eficiência destas tecnologias. A Manutenção Produtiva Total (*Total Production Maintenance* - TPM), tem sido a metodologia de gestão mais disseminado para garantia dos equipamentos e sistemas das empresas, em conjunto com a aplicação das técnicas de manutenção preditivas. Desta forma o objetivo desta pesquisa é analisar a contribuição da metodologia do TPM no processo produtivo da indústria 4.0 na fabricação mecânica e nas tecnologias digitais que estruturam a Indústria 4.0. Para alcançar este objetivo foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura, visando demonstrar as contribuições do TPM para suportar as tecnologias digitais. Além desta proposição teórica, a pesquisa realizou estudos em empresas que utilizam as tecnologias digitais da Indústria 4.0 no processo produtivo para avaliar o cenário atual e as ações na gestão dos ativos de tecnologias digitais. Os resultados da RSL demonstraram que as atividades da metodologia do TPM que podem contribuir e suportar as tecnologias digitais, assim como a pesquisa de campo demonstrou que a utilização da manutenção produtiva total para suportar as tecnologias digitais é aplicável, que 100% das empresas que participaram das pesquisas utilizam manutenção corretiva; que as empresas que participaram da pesquisa não aplicam uma gestão da manutenção estruturada e que 100% das empresas que participaram da pesquisa entendem que a aplicação da metodologia do TPM aprimoraria o controle sobre a vida útil dos equipamentos, sobre a confiabilidade e sobre o desempenho destas empresas. A pesquisa em questão demonstra que o surgimento das novas tecnologias digitais (4ª revolução industrial) também afetará a gestão de manutenção dos ativos que compõem estas tecnologias.

**Palavras-chave:** TPM, Fabricação Mecânica, Manutenção, Indústria 4.0

## ABSTRACT

The emergence and evolution of digital technologies, in the so-called 4th Industrial Revolution (I4.0), have made production processes (mechanical manufacturing) and interactivity between all processes in companies more agile. However, dependence on these new digital technologies has also increased, generating a need to keep systems reliable to the point that they do not fail and compromise the entire operation of the company. The application of maintenance management in the structuring technologies of Industry 4.0 aims to identify and detect the operational conditions of components, mitigate failures and thus improve the efficiency of these technologies. Total Production Maintenance (TPM) has been the most widespread management methodology for guaranteeing companies' equipment and systems, together with the application of predictive maintenance techniques. Thus, the objective of this research is to analyze the contribution of the TPM methodology in the production process of Industry 4.0 in mechanical manufacturing and in the digital technologies that structure Industry 4.0. To achieve this objective, a Systematic Literature Review was carried out, aiming to demonstrate the contributions of TPM to support digital technologies. In addition to this theoretical proposition, the research carried out studies in companies that use Industry 4.0 digital technologies in the production process to evaluate the current scenario and actions in the management of digital technology assets. The results of the RSL demonstrated that the activities of the TPM methodology that can contribute to and support digital technologies, as well as the field research demonstrated that the use of total productive maintenance to support digital technologies is applicable, that 100% of the companies that participated in the research use corrective maintenance; that the companies that participated in the research do not apply structured maintenance management and that 100% of the companies that participated in the research understand that the application of the TPM methodology would improve control over the useful life of equipment, reliability and performance of these companies. The research in question demonstrates that the emergence of new digital technologies (4th industrial revolution) will also affect the maintenance management of the assets that make up these technologies.

**Keywords:** *TPM, Mechanical Manufacturing, Maintenance, Industry 4.0*

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Evolução dos Tipos de Manutenção Vs Benefícios.....                               | 19 |
| Figura 2 – Casa do TPM .....                                                                 | 21 |
| Figura 3 - Cálculo do OEE baseado nas Seis Grandes Perdas .....                              | 25 |
| Figura 4 - Industria 4.0 - Quarta revolução Industrial .....                                 | 27 |
| Figura 5 - Industria 4.0 - Tecnologias e princípios.....                                     | 28 |
| Figura 6 - Sistema Ciber Físico .....                                                        | 29 |
| Figura 7 - Elementos Formadores da Industria 4.0 (A casa da I4.0) .....                      | 30 |
| Figura 8 – Requisitos Técnicos de Identificação e Combate a ataques Cibernéticos...<br>..... | 35 |
| Figura 9 – Definições atualizadas das Tecnologias Digitais.....                              | 38 |
| Figura 10 - <i>Framework</i> Tecnologias Digitais das I4.0 .....                             | 45 |
| Figura 11 - Etapas da Pesquisa .....                                                         | 47 |
| Figura 12 - Protocolo RSL.....                                                               | 48 |
| Figura 13 - <i>Framework Additive Manufacturing</i> (3D) & TPM.....                          | 63 |
| Figura 14 - <i>Framework Artificial Intelligence</i> (AI) & TPM... ..                        | 64 |
| Figura 15 - <i>Framework Augmented Reality</i> & TPM... ..                                   | 64 |
| Figura 16 - <i>Framework Automation and Robots</i> & TPM... ..                               | 65 |
| Figura 17 - <i>Framework Big Data Analysis</i> & TPM.....                                    | 65 |
| Figura 18 - <i>Framework Block Chain</i> & TPM.....                                          | 66 |
| Figura 19 - <i>Framework Cloud Computing</i> & TPM... ..                                     | 66 |
| Figura 20 - <i>Framework Cyber Security System</i> & TPM... ..                               | 67 |
| Figura 21 – <i>Framework Machine Learning</i> & TPM... ..                                    | 67 |
| Figura 22 - <i>Framework QR Code</i> & TPM.....                                              | 68 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23 - <i>Framework RIFD &amp; TPM</i> .....                                  | 68 |
| Figura 24 - <i>Framework Simulaltion and Modeling &amp; TPM</i> .....              | 69 |
| Figura 25 - <i>Framework Virtual Reality &amp; TPM</i> .....                       | 69 |
| Figura 26 - <i>Framework Geral da Contribuição do TPM para Industria 4.0</i> ..... | 71 |
| Figura 27 – Respostas ao questionário.....                                         | 72 |
| Figura 28 - Percepção sobre a Metodologia do TPM para I4.0 .....                   | 76 |
| Figura 29 – Contribuições do Pilar Manutenção Especifica .....                     | 79 |
| Figura 30 - Contribuições do Pilar Manutenção Autônoma .....                       | 80 |
| Figura 31 - Contribuições do Pilar Manutenção Planejada .....                      | 81 |
| Figura 32 - Contribuições do Pilar Treinamento e Educação .....                    | 81 |
| Figura 33 - Contribuições do Pilar Controle Inicial .....                          | 82 |
| Figura 34 - Contribuições do Pilar Manutenção da Qualidade .....                   | 83 |
| Figura 35 - Contribuições do Pilar Administração .....                             | 83 |
| Figura 36 - Contribuições do Pilar Segurança e Meio Ambiente .....                 | 84 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Variedades de citações das tecnologias digitais.....    | 44 |
| Tabela 2 – Resultado da pesquisa RSL.....                          | 49 |
| Tabela 3 – Práticas do TPM para Industria 4.0.....                 | 56 |
| Tabela 4 – Métrica do resultado do questionário.....               | 77 |
| Tabela 5 – Atividades de Manutenção Aplicadas pelas Empresas ..... | 78 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|          |                                                                                 |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 3D       | Três Dimensões                                                                  |
| AI       | <i>Artificial Intelligence</i> (Inteligência Artificial)                        |
| AM       | <i>Additive Manufaturing</i> (Manufatura aditiva)                               |
| AR       | <i>Augmented Reality</i> (Realidade Aumentada)                                  |
| Big Data | <i>Big Data Analysis</i> (análise de grande volume de dados)                    |
| BM       | <i>Breakdown Maintenance</i> (Quebra/falha do equipamento)                      |
| CBM      | <i>Condition Based Maintenance</i> (manutenção baseada na condição operacional) |
| Clouds   | <i>Clouds Computing</i> (Computação em nuvem)                                   |
| CPS      | <i>Cyber Phisical Systems</i> (Sistemas Ciber Físicos)                          |
| I4.0     | Industria 4.0 (ou Quarta revolução Industrial)                                  |
| TPM      | <i>Total Productive Maintenance</i> (Manutenção Produtiva Total)                |
| IoS      | <i>Internet of Service</i> (internet de serviços)                               |
| IoT      | <i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)                                 |
| IROG     | Índice de Rendimento Operacional Global                                         |
| M2M      | <i>Machine to Machine</i> (máquina para máquina)                                |
| ML       | <i>Machine Learning</i> (máquinas inteligentes)                                 |
| MC       | Manutenção Corretiva                                                            |
| MPred.   | Manutenção Preditiva                                                            |
| MTBF     | <i>Mean Time Between Failure</i> (Tempo Médio entre as Falhas)                  |
| MTTR     | <i>Mean Time to Repair</i> (Tempo Médio para Reparo)                            |
| OEE      | <i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficiência Global dos Equipamentos)     |
| PM ou MP | <i>Preventive Maintenance</i> (Manutenção Preventiva)                           |
| QR Code  | <i>Quick Response</i> (Código de Resposta Rápida)                               |
| RFID     | <i>Radio Frequency Identification</i> (Identificação por Rádio Frequência)      |
| RPA      | <i>Robotic Process Automation</i> (Automação Robótica de Processos)             |
| RSL      | Revisão Sistemática de Literatura                                               |
| SFC      | <i>Service Function Chain</i> (Cadeia de Função de Serviço)                     |
| TI       | Tecnologia da Informação                                                        |
| VR       | <i>Virtual Reality</i> (Realidade Virtual)                                      |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                     |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                             | <b>15</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS.....                                                                                      | 17        |
| 1.1.2    | <b>Objetivo Geral .....</b>                                                                         | <b>17</b> |
| 1.1.3    | <b>Objetivos Específicos.....</b>                                                                   | <b>17</b> |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                                                   | <b>18</b> |
| 2.1      | CONCEITOS DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL .....                                                            | 18        |
| 2.1.1    | <b>Tipos e Manutenção Industrial .....</b>                                                          | <b>18</b> |
| 2.2      | CONCEITOS DO TPM.....                                                                               | 20        |
| 2.2.1    | <b>Pilares do TPM .....</b>                                                                         | <b>20</b> |
| 2.2.2    | <b>Conceito de Eficácia Global do Equipamento - OEE na Metodologia do TPM .....</b>                 | <b>23</b> |
| 2.3      | CONCEITO DA INDUSTRIA 4.0 - I4.0.....                                                               | 25        |
| 2.3.1    | <b>Definição das Tecnologias Digitais da I4.0.....</b>                                              | <b>32</b> |
| 2.3.2    | <b>Consolidação das Principais Tecnologias Digitais .....</b>                                       | <b>38</b> |
| 2.3.3    | <b>Definição dos <i>Design Principal</i> (Arranjos Construtivos).....</b>                           | <b>40</b> |
| 2.4      | CONCEITO DE <i>FRAMEWORK</i> .....                                                                  | 42        |
| 2.4.1    | <b><i>Framework</i> das Tecnologias Digitas I4.0.....</b>                                           | <b>43</b> |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                                             | <b>46</b> |
| 3.1      | CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....                                                                     | 46        |
| 3.2      | ETAPAS DA PESQUISA .....                                                                            | 47        |
| 3.2.1    | <b>Revisão Sistemática da Literatura TPM Vs I4.0.....</b>                                           | <b>48</b> |
| 3.2.2    | <b>Análise da Contribuição do TPM para a Industria 4.0 .....</b>                                    | <b>49</b> |
| 3.2.3    | <b>Aplicação dos Conceitos do TPM Vs Tecnologias Digitais da I4.0 .....</b>                         | <b>50</b> |
| 3.2.4    | <b>Preparação do <i>Framework</i> da Contribuição do TPM para a I4.0 .....</b>                      | <b>50</b> |
| 3.2.5    | <b>Pesquisa de Campo sobre TPM Vs I4.0 .....</b>                                                    | <b>50</b> |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                                                             | <b>55</b> |
| 4.1      | RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....                                                | 55        |
| 4.2      | DESCRIÇÃO DA ANÁLISE E APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DO TPM E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A INDUSTRIA 4.0 ..... | 57        |
| 4.2.1    | <b>Pilar Melhoria Especifica.....</b>                                                               | <b>57</b> |
| 4.2.2    | <b>Pilar Manutenção Autônoma .....</b>                                                              | <b>58</b> |

|       |                                                                            |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.3 | Pilar Manutenção Planejada .....                                           | 58 |
| 4.2.4 | Pilar Treinamento e Educação.....                                          | 59 |
| 4.2.5 | Pilar Controle Inicial (Melhoria de Projeto).....                          | 60 |
| 4.2.6 | Pilar Manutenção e Qualidade.....                                          | 60 |
| 4.2.7 | Pilar Administração (Área de Apoio).....                                   | 61 |
| 4.2.8 | Pilar Segurança e Meio Ambiente .....                                      | 62 |
| 4.3   | REPRESENTAÇÃO DA COLABORAÇÃO DO TPM COM AS TECNOLOGIAS DIGITAIS.....       | 62 |
| 4.4   | FRAMEWORK DA COLABORAÇÃO DO TPM PARA INDUSTRIA 4.0.....                    | 70 |
| 4.5   | AVALIAÇÕES DA PESQUISA DE CAMPO SOBRE A GESTÃO DA MANUTENÇÃO E O TPM. .... | 72 |
| 4.6   | AVALIAÇÃO DAS PERCEPÇÕES DOS ENTREVISTADOS SOBRE TPM. ...                  | 76 |
| 4.7   | AVALIAÇÃO DO QUESTIONÁRIO APLICADO.....                                    | 76 |
| 4.8   | REAValiação DO FRAMEWORK Vs PESQUISA DE CAMPO .....                        | 76 |
| 4.8.1 | Pilar Melhoria Específica.....                                             | 78 |
| 4.8.2 | Pilar Manutenção Autônoma .....                                            | 79 |
| 4.8.3 | Pilar Manutenção Planejada .....                                           | 80 |
| 4.8.4 | Pilar Treinamento E Educação .....                                         | 81 |
| 4.8.5 | Pilar Controle Inicial (Melhoria de Projeto).....                          | 82 |
| 4.8.6 | Pilar Manutenção da Qualidade.....                                         | 82 |
| 4.8.7 | Pilar Administração (Área de Apoio).....                                   | 83 |
| 4.8.8 | Pilar Segurança e Meio Ambiente .....                                      | 84 |
| 5     | DISCUSSÕES DOS RESULTADOS .....                                            | 85 |
| 6     | CONCLUSÕES.....                                                            | 87 |
| 7     | OPORTUNIDADES FUTURAS .....                                                | 90 |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                          | 91 |
|       | REFERÊNCIAS NOMINAIS.....                                                  | 91 |
|       | REFERÊNCIAS POR ESTRATO.....                                               | 98 |
|       | REFERÊNCIAS POR QUALIS .....                                               | 99 |
|       | REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS .....                                     | 99 |

## 1. INTRODUÇÃO

A 4ª revolução industrial (I4.0), assim como as outras revoluções industriais, gera um aumento da competitividade no mercado. Esta nova revolução industrial é caracterizada por um alto grau de automação das máquinas de controle automatizadas (sistemas ciber físicos), bem como um alto uso de internet na nuvem, big data e outras tecnologias de produção inteligentes. Além disso, a 4ª revolução industrial considera um enorme uso de sistemas de rede inteligentes, com inovações de produtos, de procedimentos e de serviços. (Sahara et al., 2024).

A quarta revolução industrial ou “I4.0” é definida como o uso de tecnologias digitais para aumentar a eficiência e personalizar a produção, através de ativos físicos conectados e o processamento inteligente de dados. Visando a importância estratégica do conhecimento e tomada de decisões instantânea, houve o surgimento de máquinas inteligentes, da inteligência artificial (AI), de nanotecnologias na robótica e o uso eficaz de dados on-line para decisões automáticas por meio de análises, decisões inteligentes e aprendizado de máquina. Essas tecnologias podem melhorar a eficiência, a produtividade e a sustentabilidade de vários setores (Onu et al., 2023).

Pensando em melhorar o desempenho das empresas que utilizam a 4ª revolução tecnológica e digital, que conforme Schwab (2016) revolucionarão a maneira que vivemos, trabalhamos e nos relacionamos, faz-se necessário o desenvolvimento de estratégias e ferramentas de manutenção para melhorar o correto funcionamento das tecnologias digitais, o aumento da sua eficiência, a competitividade das empresas e sua sustentabilidade no mercado.

Segundo Manta et al. (2024), as questões relacionadas ao controle de manutenção nas plantas industriais devem ser analisadas fornecendo uma visão abrangente com a aplicação nas tecnologias digitais e na digitalização. A estratégia de manutenção a ser utilizada terá como objetivo principal de estimar, prever ou detectar a condição dos componentes ou sistema para otimizar sua eficácia e operação.

No ambiente de alta competitividade, sob a perspectiva de utilização das novas tecnologias digitais na fabricação mecânica, observa-se a busca por um maior controle das condições dos processos, visando a eliminação das perdas e ganhos na produtividade das empresas. Para isto, poderá ser aplicado uma metodologia de

controle e melhoria baseada no TPM, durante toda a vida útil do equipamento e na utilização das novas tecnologias para o aperfeiçoamento operacional e resultados em médio e longo prazos (Sahoo et al., 2020).

O TPM combina diferentes componentes da manutenção tradicional, que geralmente se enquadram em categorias, manutenção reativa, manutenção proativa e manutenção preditiva. Esses tipos de manutenção se complementam para melhorar o desempenho operacional e apresentam diferentes oportunidades ao considerar sua digitalização (Tortorella et al., 2022). A aplicação da manutenção preditiva é uma estratégia de manutenção que usa tecnologias avançadas, para prever falhas ou mau funcionamento dos componentes, das plantas industriais e para operar de maneira oportuna e eficiente. Por meio do monitoramento constante dos parâmetros operacionais e análise de dados em tempo real, é possível detectar sinais de anomalias ou desvios das condições normais de operação (Tancredi et al., 2024).

Na I4.0, as equipes de manutenção devem ser auxiliadas por instrumentos vinculados a inteligência das máquinas para realizar efetivamente suas atividades, sem a necessidade de saber a posição precisa das máquinas ou conhecimento detalhado sobre a topologia programável (Alatawi et al., 2023).

Na forma de demonstrar que a aplicação da metodologia de controle e melhoria, baseada no TPM, contribuirá para um melhor desempenho das tecnologias digitais e, conseqüentemente, para a fabricação mecânica mais enxuta, é proposto um estudo para apresentar a contribuição dos pilares do TPM com as tecnologias da I4.0. Além de um estudo teórico, através de uma revisão sistemática da literatura para investigar a contribuição do TPM para a Indústria 4.0 e suas tecnologias, será realizada uma pesquisa qualitativa e exploratória com empresas que utilizam as tecnologias digitais da I4.0, afim de identificar o cenário atual da gestão da manutenção destas tecnologias e a aplicação de possíveis estratégias de controle da manutenção dos equipamentos para melhorar a gestão da manutenção.

Neste sentido, a pesquisa utiliza uma estrutura de trabalho apresentada em capítulos, iniciando com a Introdução. Na sequência são apresentados os capítulos referentes à fundamentação teórica, à metodologia aplicada, à apresentação dos resultados obtidos, à discussão dos resultados e à conclusão.

## 1.1 OBJETIVOS

Neste subcapítulo são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

### 1.1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral da presente pesquisa é analisar a contribuição da Manutenção Produtiva Total como suporte para as tecnologias digitais que formam a Indústria 4.0 na fabricação mecânica.

### 1.1.3 Objetivos Específicos

A presente pesquisa tem como objetivos específicos:

- Identificar a contribuição dos Pilares do TPM para tecnologias digitais que estruturam a indústria 4.0 através de uma revisão sistemática da literatura.
- Desenvolver um *Framework* teórico para evidenciar a contribuição do TPM na gestão da manutenção para as tecnologias digitais (que estruturam) da Indústria 4.0 para a fabricação mecânica.
- Por meio de uma pesquisa qualitativa, identificar o cenário de gestão de manutenção sobre as tecnologias que estruturam a I4.0, a contribuição e suporte do TPM para as tecnologias digitais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a composição da fundamentação teórica deste trabalho de pesquisa, foram estudados e descritos os conceitos de Manutenção Industrial, TPM, Eficiência Global dos Equipamentos (OEE) e I4.0.

### 2.1 CONCEITOS DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Com os mercados competitivos, as empresas reconheceram a importância e a necessidade de evoluir a gestão da manutenção. A manutenção é uma tarefa significativa em qualquer sistema de manufatura e tem papel fundamental na busca dos objetivos da organização (HEMMATI, 2018).

A manutenção é toda ação técnica e administrativa que visa manter ou tornar operável, nas condições requeridas, qualquer equipamento. E o aperfeiçoamento da manutenção é definido como um método para determinar as ações e as estratégias mais eficazes e eficientes para o desempenho do equipamento (Shafiee et al., 2019).

O primeiro passo para o cumprimento dos objetivos da manutenção, que são a garantia de confiabilidade e disponibilidade das funções dos equipamentos e instalações, elevando a capacidade de fornecer as necessidades de um serviço ou processo produtivo, é a definição da estratégia a ser empregada em cada equipamento, levando em conta a criticidade do mesmo para a operação e os custos de manutenção (Pinto e Xavier, 2009).

#### 2.1.1 Tipos e Manutenção Industrial

Várias políticas e estratégias de manutenção foram estudadas e utilizadas, mesmo sem haver uma unanimidade sobre quantos e quais os tipos de manutenções existem. Na maioria das literaturas são definidos três tipos (Bousdekis et al., 2018):

1. Manutenção decorrente de avaria/falha de um equipamento (*Breakdown Maintenance*);
2. Manutenção Preventiva, baseada no tempo ou ciclo de operação (*Preventive Maintenance*);

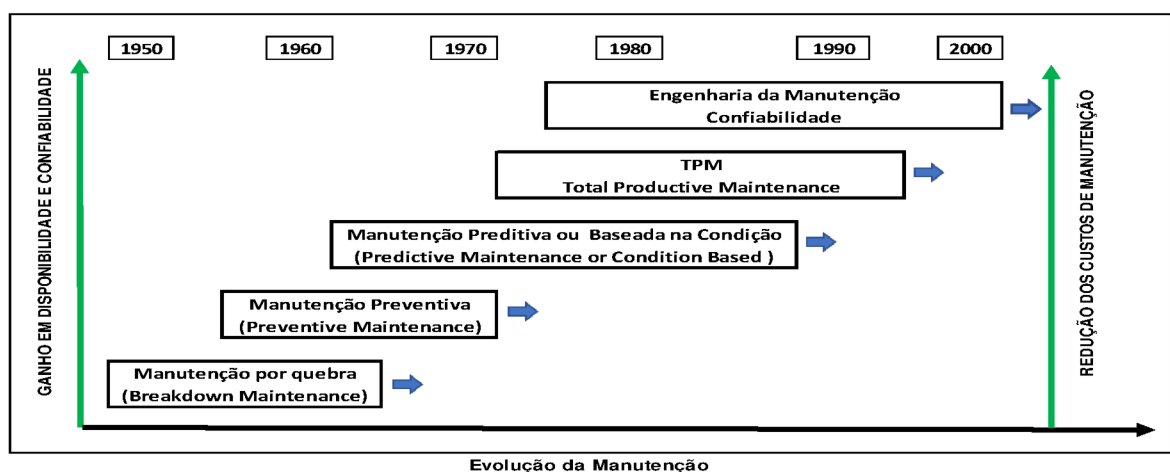
3. Manutenção Preditiva, baseada no monitoramento e análise da condição operacional do equipamento (CBM – *Condition Based Maintenance*);

Ainda, conforme a norma europeia EN 13306:2010 - *Maintenance Terminology* (2010), referente a definições e terminologias para a manutenção, os três principais tipos de manutenção são definidos como:

- a) Manutenção Corretiva: Manutenção efetuada após o reconhecimento da falha no equipamento e destinada a colocar o item em condições para desempenhar a sua função estratégica.
- b) Manutenção Preventiva: Baseada em intervalos pré-determinados de tempo, ciclos ou critérios prescritos e destinados a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.
- c) Manutenção Preditiva: Manutenção baseada em condições de parâmetros significativos da degradação do item de forma repetidas.

A Figura 1 apresenta as três principais, e mais usuais, estratégias de manutenção que estabelecem a melhor forma de atuar nas intervenções de manutenção nos equipamentos, sistemas e instalações industriais (Pinto e Xavier, 2009).

Figura 1 - Evolução dos Tipos de Manutenção Vs Benefícios



Fonte: Adaptado de Pinto e Xavier (2009).

## 2.2 CONCEITOS DO TPM

Para Nakajima (1988), o TPM tornou-se uma nova direção para a produção nesta era, quando robôs e 24 horas de produção automatizada já é uma realidade. A fábrica não tripulada tornou-se uma possibilidade realista. Ao discutir o controle de qualidade, as pessoas costumam dizer que a qualidade depende do processo. Porém, com o aumento da robotização e automatização, pode ser mais apropriado dizer que a produtividade, o custo, o estoque, a saúde e segurança, a produção e qualidade dependem dos equipamentos.

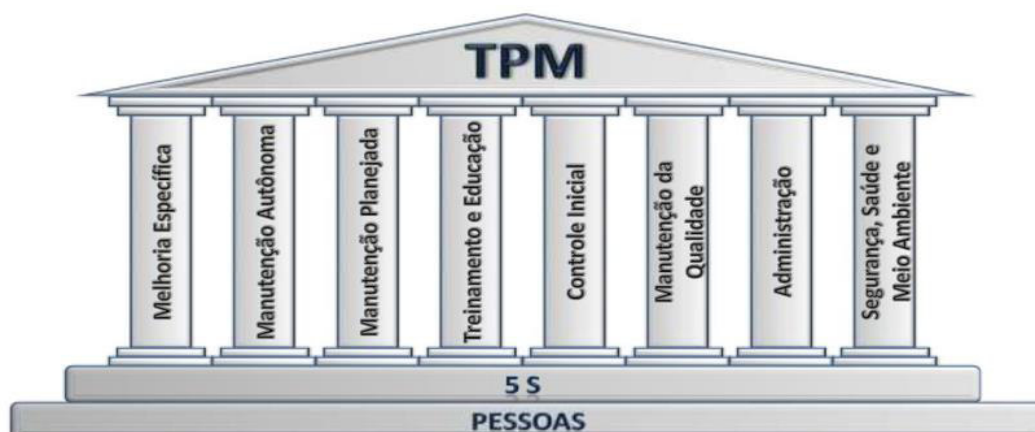
Ainda segundo Nakajima (1988), o TPM é um programa de manufatura projetado para maximizar a eficácia do equipamento durante toda a sua vida útil, o TPM pode desempenhar um papel significativo para contribuir com a eficácia dos equipamentos e proporcionar rentabilidade em longo prazo. Essa importante metodologia de manutenção com estratégias organizadas, e que melhora a qualidade com alta produtividade (Chaurey et al., 2023). Ainda segundo Nakajima (1988), O TPM proporciona melhoria na eficiência da planta industrial, o que permite melhoria rápida e contínua nos processos de fabricação mecânica, através do envolvimento e capacitação dos colaboradores.

O TPM visa melhorar o desempenho operacional das empresas e apresenta um impacto positivo na produtividade, no custo, na qualidade, na entrega, na segurança e na moral dos colaboradores (Sahoo et al., 2020). O TPM promoverá resultados através da participação de todos os níveis hierárquicos da empresa e por meio da aplicação de seus oito pilares, com suas atividades para atingir as metas previstas (Sing et al., 2018).

### 2.2.1 Pilares do TPM

O TPM tem sua representação através da Figura 2, com a representação dos seus oito pilares e que demonstram a abrangência e envolvimento de toda organização.

Figura 2 - Casa do TPM



Fonte: Adaptado de Ahuja et al. (2008)

A seguir são apresentadas as definições de cada pilar do TPM, tendo como base a descrição de Ahuja et al. (2008):

- **Melhoria Específica:** Trabalhando na identificação sistemática das 6 grandes perdas (apresentadas posteriormente), mitigando as mesmas, através da utilização de ferramentas para identificação e redução das perdas, aumentando a eficiência do equipamento.
- **Manutenção Autônoma:** Estabelece o protagonismo do operador sobre o equipamento, onde o mesmo, de forma proativa, aplicará ações simples de melhoria contínua (limpeza, lubrificação, aperto, ajuste e inspeção), visando aumentar a vida útil, identificar situações fora do padrão e operacionalidades do equipamento, assim como aprimorar seu conhecimento sobre o equipamento.
- **Manutenção Planejada:** Com o grande objetivo de eliminar as intervenções corretivas, aplica-se ações para detectar, prevenir ou mesmo reduzir erros e falhas nos equipamento, através da gestão das atividades de manutenção preventiva e/ou preditiva ao longo ciclo de vida do equipamento, estabelecendo rotinas de inspeções (*Checklist*) e melhorando assim os indicadores de MTBF e MTTR: **MTBF:** *Mean time between failure* ou Tempo médio entre as falhas (NBR 5462:1994), ou média dos tempos de operação entre falhas (EN 13306:2010); **MTTR:**

*Mean time to repair* ou tempo médio para reparo (NBR 5462:1994), ou médias dos tempos para restauração (EN 13306:2010).

- **Treinamento e Educação:** Possui o objetivo de transmitir conhecimento, desenvolver as habilidades interpessoais, aprendizado sobre novas tecnologias, alinhamento dos colaboradores com os objetivos organizacionais e avaliação periódicas das habilidades e conhecimento dos colaboradores.
- **Controle Inicial:** Utiliza o aprendizado sobre os sistemas existentes para aperfeiçoar os novos sistemas, prevendo iniciativas de melhoria de manutenção, também chamada de Melhoria de Projeto.
- **Manutenção da Qualidade:** Rastreamento e tratamento de problemas de equipamentos e sua causa raiz, definindo as condições operacionais na busca pelo objetivo de “Zero Defeito”.
- **Administração:** Aplicar o sistema organizacional em toda empresa, melhorando a sinergia entre as áreas, eliminando as atividades que não agregam valor ao negócio, impactando na área operacional e no resultado da empresa.
- **Segurança, Saúde e Meio ambiente:** Garantindo um ambiente seguro de trabalho, através de procedimentos de segurança, ambiente adequado e atividades sustentáveis ao meio ambiente. Envolve todas as atividades necessárias para o desenvolvimento dos Pilares do TPM, anteriormente descritos.

Ao implementar o TPM é possível identificar seis principais fontes de perdas que diminuem a eficiência na produção. Essas perdas são: *falha no equipamento; set-ups e ajustes; pequenas paralisações; redução de velocidade; defeitos no processo; e perda de rendimento*. Assim, o TPM pode gerar diversos benefícios para qualquer unidade industrial, tais como, maior controle sobre ferramentas e equipamentos, redução de tempo de falha, melhorando o tempo de resposta e reforçando a coordenação entre produção e manutenção (Dos Reis et al., 2019).

Todo esse esforço para reduzir as perdas visa aumentar a Eficácia Global dos Equipamentos (OEE - *Overall Equipment Effectiveness*), indicador que está

diretamente ligado ao desempenho, à qualidade e à disponibilidade dos equipamentos (Pinto et al., 2020).

### 2.2.2 CONCEITO DE EFICÁCIA GLOBAL DO EQUIPAMENTO - OEE NA METODOLOGIA DO TPM

Uma das ferramentas mais aplicadas, difundidas e importantes na medição de desempenho da fabricação mecânica é a eficácia global do equipamento (OEE). OEE é considerado a medição do desempenho do TPM (Tsarouhas, 2018). Ainda segundo Tsarouhas (2018), o OEE fornece uma métrica quantitativa baseada na disponibilidade, no desempenho e na qualidade dos elementos para medir a eficácia do desempenho de equipamentos individuais ou processos inteiros. Mede a eficácia do equipamento e sua produtividade, mostra o percentual do tempo verdadeiramente produtivo, o qual consiste em três fatores: disponibilidade, desempenho e qualidade. Assim, o estudo do tempo com visualização do OEE ajuda a corrigir e eliminar o desperdício de tempo que pode ocorrer no processo de fabricação (Ghafoorpoor et al., 2018).

Segundo Heng et al. (2019), o OEE tem sido amplamente utilizado como ferramenta quantitativa essencial para a medição da produtividade nas indústrias manufatureiras, pois ele é projetado para identificar e eliminar as perdas, para melhorar o desempenho e para aumentar a confiabilidade das instalações.

O cálculo do OEE tornou-se um instrumento importante e comumente utilizado nas empresas para detectar e monitorar a produtividade da máquina (Nakajima, 1988). Também, seguindo o conceito descrito por Ahuja et al. (2008), o TPM emprega o OEE como uma métrica quantitativa para medir o desempenho de um sistema produtivo.

Conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), o TPM utiliza três índices principais para o cálculo do OEE: a disponibilidade; a taxa de velocidade; e a taxa de qualidade. Descritos a seguir e representados por suas respectivas equações.

- **Disponibilidade:** A disponibilidade, conforme apresentada na equação (2.1) avalia o tempo real utilizado para a produção e sua formula é:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Tempo de Produção (Efetivo)}}{\text{Tempo Programado}} \quad (2.1)$$

- **Taxa de Velocidade:** A taxa de velocidade, representada na equação (2.2) avalia a velocidade de produção real do equipamento comparando com a velocidade teórica máxima de produção. Sua fórmula é o Tempo do Ciclo Teórico/Tempo de Ciclo Real. Sendo que Tempo de Ciclo Teórico é o tempo ideal mínimo para produção de uma unidade. Já o Tempo do Ciclo Real é o tempo de produção/Quantidade total de peças produzidas. Desta forma, a fórmula para o cálculo da taxa de Velocidade é:

$$\text{Taxa de Velocidade} = \frac{\text{Tempo do Ciclo Teórico.}}{(\text{Tempo de Produção/Quantidade de total de peças produzidas})} \quad (2.2)$$

- **Taxa de Qualidade:** A Taxa de Qualidade, demonstrada na equação (2.3), é a avaliação da quantidade de peças produzidas conforme especificado, durante o tempo de análise. Sua fórmula considera as Unidades Produzidas Conforme dividindo sobre as Unidades Produzidas. Sendo que as Unidades Produzidas Conforme é o resultado das (unidades produzidas - unidades defeituosas). A formula para o cálculo da taxa de qualidade pode ser representada por:

$$\text{Taxa de Qualidade} = \frac{(\text{Unidades Produzidas Conforme} - \text{Unidades Defeituosas})}{\text{Unidades Produzidas}} \quad (2.3)$$

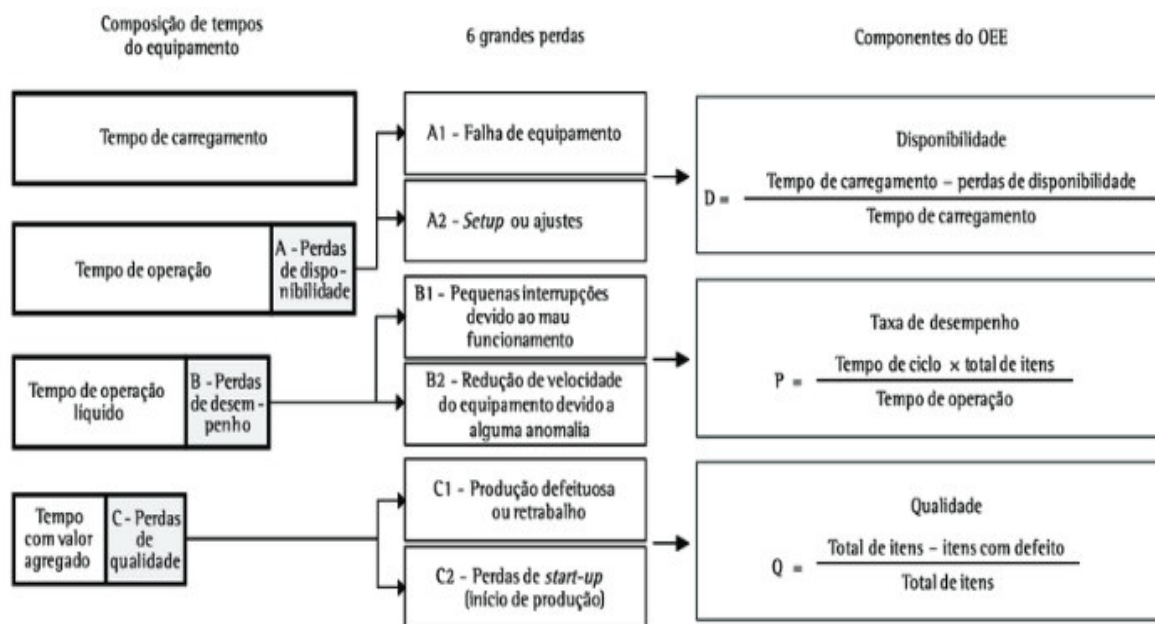
O cálculo do OEE é realizado pelo produto simples e direto da Disponibilidade, Taxa de Velocidade (Desempenho) e a Taxa de Qualidade, vide equação (2.4).

$$\text{OEE} = (\text{Disponibilidade} \times \text{Taxa de Velocidade} \times \text{Taxa de Qualidade}) \times 100 \quad (2.4)$$

O cálculo do OEE tornou-se amplamente aceito como uma ferramenta quantitativa essencial para medição da produtividade nas operações de manufatura. Segundo Ahuja et al. (2008), um OEE de 85% pode ser considerado como desempenho de classe mundial.

A Figura 3 mostra a relação do OEE em termos de seus componentes, do tipo de perda e do componente do tempo de fabricação.

Figura 3 - Cálculo do OEE baseado nas Seis Grandes Perdas



Fonte: Adaptado de Ahuja et al. (2008).

### 2.3 CONCEITO DA INDÚSTRIA 4.0 - I4.0

A Indústria 4.0 é um novo modelo industrial, que parece ter grande potencial para ajudar as empresas a enfrentar os desafios atuais no processo de geração de valor. É uma interligação inteligente de máquinas, pessoas, objetos, sistemas de informação e comunicação ao longo da cadeia de valor. É baseada em uma infraestrutura ciber-física feita por diversas camadas de tecnologias estruturantes, que é o ponto de encontro entre os processos físicos ao longo do ciclo de vida do produto e sua projeção virtual, feita pela coleta de uma grande quantidade de dados (Lardo et al., 2020).

Esta revolução industrial teve origem pela crescente difusão das tecnologias digitais, especialmente nos sistemas de produção, levando a um novo paradigma

industrial, onde no centro da indústria 4.0 há a implementação de sistemas ciber-físicos (CPS) para fabricação industrial, ou seja, redes de microcomputadores, sensores e atuadores, máquinas ou produtos que estão conectados ao longo da cadeia de valor. Isso juntamente com a disponibilidade de sofisticados sistemas para processar e analisar dados em tempo real, assim como simulação, realidade aumentada, sistema integrados, computação em nuvem, segurança cibernética e manufatura aditiva são outras tecnologias da I4.0 (Bellantuono et al., 2021).

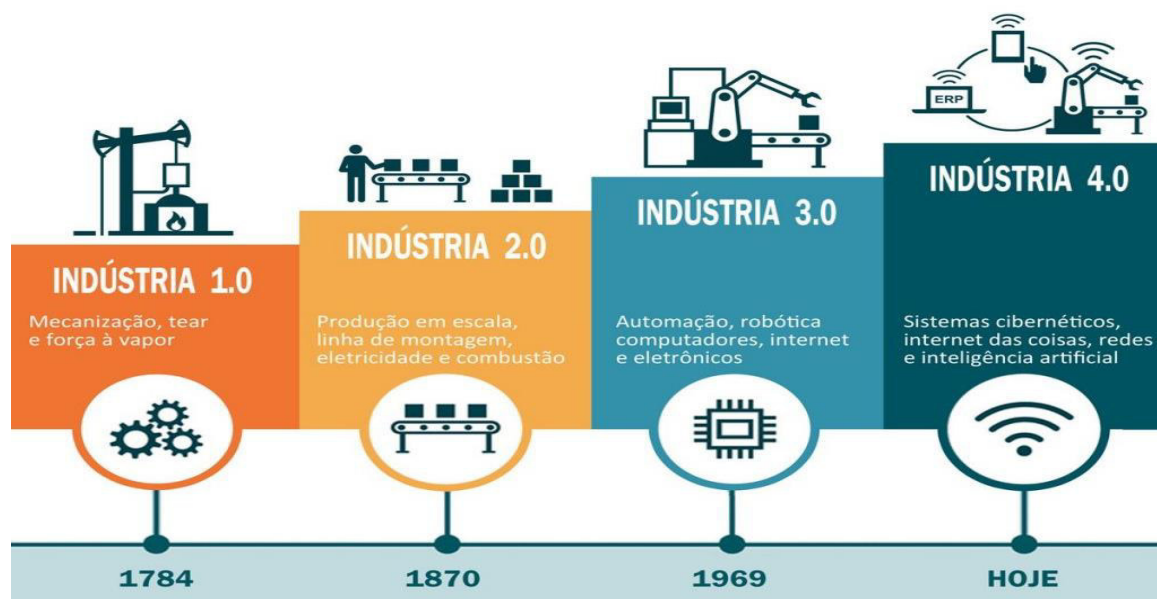
O surgimento de novas tecnologias, como computação em nuvem (*Cloud Computing*), Internet das Coisas (IoT), *Cyber Physical Systems* (CPS) e Big Data é englobado pelo conceito da Indústria 4.0. Estas novas tendências têm o seu papel na melhoria da transmissão de informações por todo o sistema. Portanto, o ‘sistema de execução’ da Indústria 4.0 é baseado nas inter-relações entre os blocos de construção (*Blockchains*) dos Sistemas Ciber Físicos (CPS). Estes tipos de blocos podem ser vistos como sistemas embarcados com controle descentralizado e conectividade avançada (Salvadorinho et al., 2021).

A integração de robótica e sistemas ciber físicos (CPS) em espaços fabris pode levar ao aumento da produtividade e à melhoria na operação de uma planta industrial, devido ao monitoramento em tempo real e menor tempo de parada na linha de produção. Isso, no entanto, exige uma cooperação com a força de trabalho, que deve evoluir e aprender novas habilidades, mantendo seu nível de produtividade (Panagou et al., 2021).

Os termos “manufatura avançada” ou “indústria 4.0” têm sido amplamente citados na literatura em geral e estão diretamente relacionados com o futuro da manufatura e a busca pela competitividade. O mundo está vivenciando uma nova revolução industrial, evoluindo em um ritmo mais rápido do que as anteriores, que se caracteriza pela fusão ou integração entre o mundo virtual e o mundo real, através de elementos que permitem um maior grau de automação e digitalização dos processos (Silva et al., 2020). A Figura 4 ilustra a evolução da I4.0.

O papel da Indústria 4.0, habilitando novas tecnologias para apoiar a transformação digital e garantir que as melhores estratégias estejam disponíveis para obter todos os benefícios, mudou o foco da digitalização (conversão de dados para formato digital) para a digitalização focada no “processo operacional e organizacional” ou “processo de negócios” devido as mudanças tecnologicamente induzidas dentro das indústrias, organizações e mercados (Butt, 2020).

Figura 4 - Indústria 4.0: A Quarta revolução Industrial



Fonte: Silva et al. (2020)

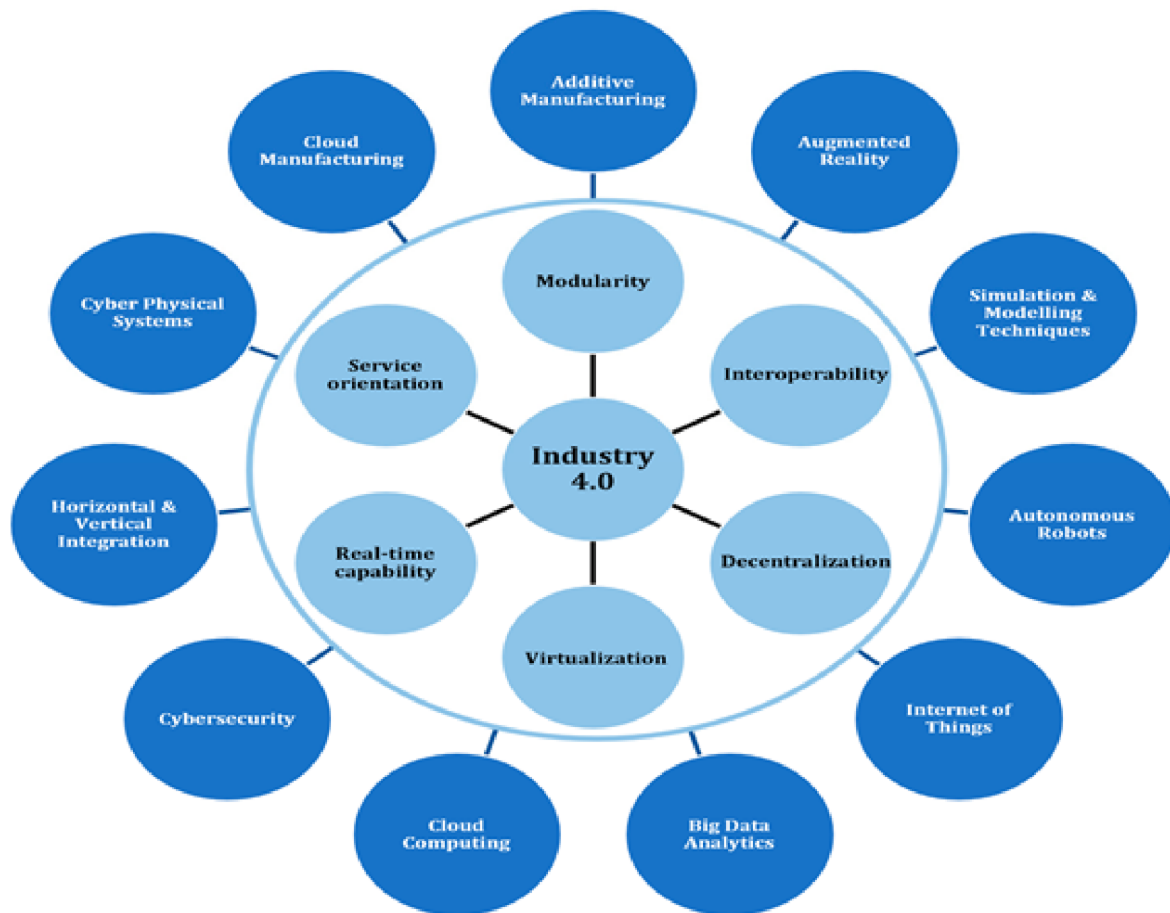
A digitalização das indústrias manufatureiras possibilitou novos processos de produção usando as principais tendências tecnológicas da I4.0 e seus principais elementos, como mostrado na Figura 5.

Ainda conforme Silva et al. (2020), os conceitos associados a I4.0 ainda estão em um estágio inicial de desenvolvimento e consolidação. Assim, qualquer tentativa de classificar seus elementos torna-se complexa.

Apesar da dispersão existente, experiências que estão surgindo relacionadas com a I4.0, mostram algum consenso sobre alguns elementos fundamentais que estabelecem a noção de I4.0, incluindo CPS (*Cyber-Physical Systems*) e IoT (Internet das Coisas). As tecnologias que suportam a implementação da I4.0 são definidas como elementos estruturantes, e referem-se a domínios como automação, comunicação máquina a máquina (M2M), inteligência artificial (AI), análise de Big Data, computação em nuvem, integração de sistemas e segurança cibernética.

Outros elementos, rotulados como complementares, não são obrigatórios em todos os estudos da I4.0, mas têm reconhecida utilização por sua capacidade de ampliar as oportunidades para ela. Estes incluem: impressão 3D, etiqueta RFID, código QR, realidade aumentada e realidade virtual, entre outros. A adoção da I4.0 e suas novas tecnologias estão associadas a uma ampla gama de novos elementos tecnológicos e benefícios, bem como barreiras e desafios de implementação.

Figura 5 - Indústria 4.0: Tecnologias e princípios



Fonte: BUTT, 2020.

No entendimento de Sacomano (2018), a I4.0 assegura a integração das novas tecnologias de informação com uma nova maneira de comunicação, de modo a alcançar novos patamares de produtividades e gerenciamento de negócios. A Figura 6 ilustra os elementos de construção dos sistemas ciber físicos.

Figura 6 - Sistema Ciber Físico



Fonte: Sacomano (2018).

Ainda, conforme Sacomano (2018), uma vez que os conceitos de I4.0 estão em formação, uma classificação dos elementos que fazem parte ou não desta nova revolução industrial ainda é complexa. Desta forma, Sacomano (2018) classifica os elementos da indústria 4.0 como:

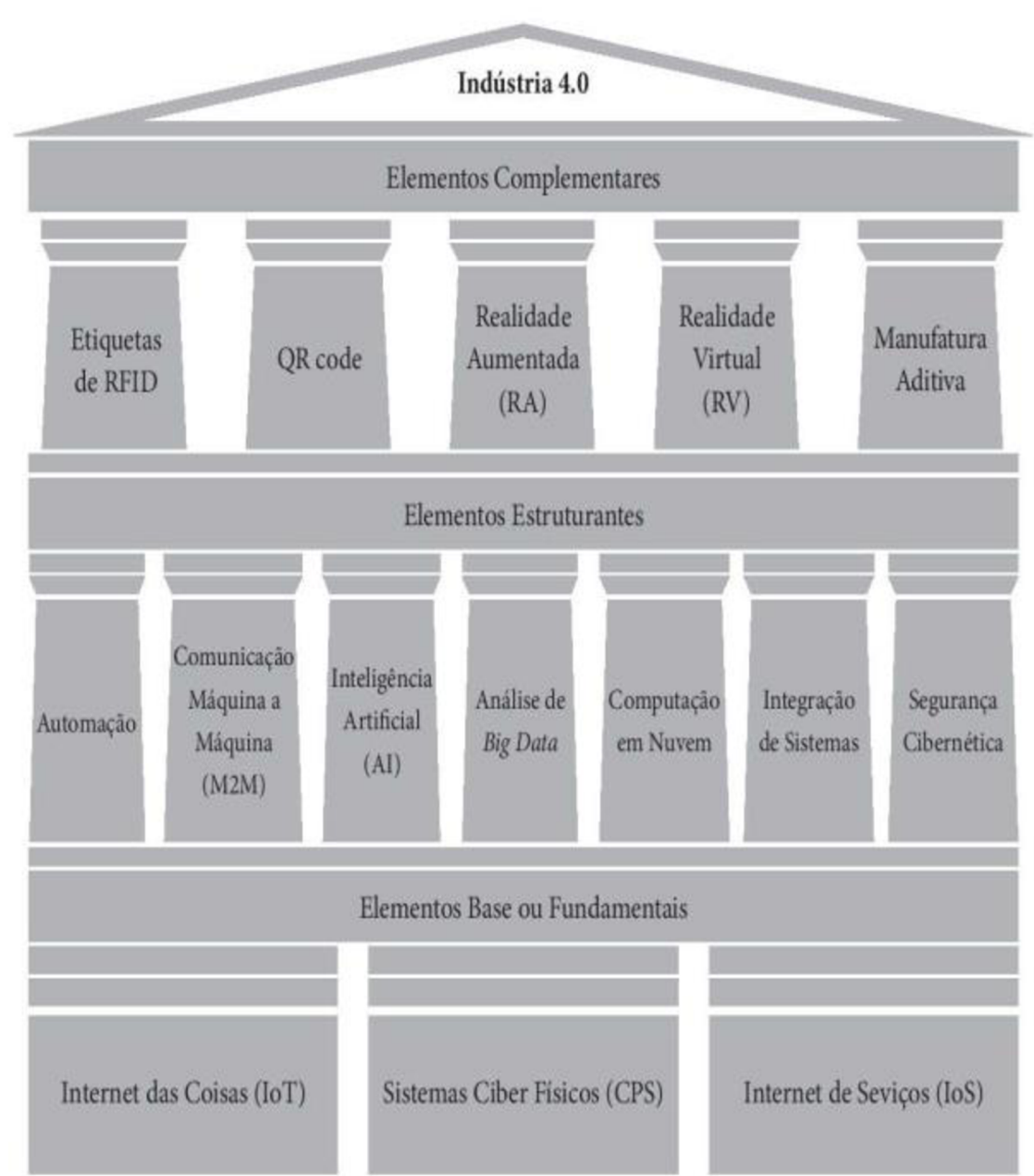
1. Elementos Bases e Fundamentais;
2. Elementos Estruturais;
3. Elementos Complementares.

A Figura 7 apresenta esses elementos e suas inter-relações.

O conceito chave por trás do I4.0 é a integração, vista ao longo de três eixos distintos: (i) integração horizontal, que visa cooperação entre empresas ao longo de uma cadeia de valor; (ii) integração vertical, que se refere à ampla automação dentro a empresa única; (iii) integração de ponta a ponta, que prevê conexões através das cadeias de valor (realizando a rede de valor) entre possivelmente cada par de participantes habilitados digitalmente (máquina a máquina, homem a máquina, humano para humano).

Mais especificamente, na visão da I4.0, espera-se que os Sistemas Ciber Físicos (CPSs), sejam interconectados e permitam a transição de uma “cadeia de valor” linear para um automatizado e altamente dinâmico (Aceto et al., 2019).

Figura 7 - Elementos Formadores da Indústria 4.0 (A casa da I4.0)



Fonte: Sacomano (2018).

Ainda na visão do Aceto et al. (2019), existem três paradigmas que explicam a visão de I4.0:

- i. O produto inteligente: os produtos são capazes de exigir recursos de produção e orquestrar o processo de produção para sua finalização;
- ii. A máquina inteligente: as máquinas se tornam ciber-físicas, sistemas de produção, onde as hierarquias de produção tradicionais são

substituídas por descentralizados, flexíveis, modulares e auto organizados (redes de produção);

- iii. O operador aumentado - o I4.0 não visa implementar a produção sem trabalhadores nas instalações e reconhece a centralidade do operador humano, alavancando o suporte tecnológico. Neste caso, o operador humano é o mais flexível no sistema de produção que pode se deparar com uma ampla gama de trabalhos diferentes, desde especificação e monitoramento da estratégia de produção.

Para Raj et al. (2020), a I4.0 é, atualmente, uma pesquisa em expansão, com a convergência de vários conceitos emergentes e novas tecnologias, como identificação por radiofrequência (RFID), big data, computação em nuvem, sensores inteligentes, aprendizado de máquina (ML), robótica, manufatura aditiva (AM), inteligência artificial (AI), realidade aumentada (AR) e Internet das Coisas (IoT).

Saucedo-Martínez et al. (2018), apresentam a I4.0 a partir de 9 blocos, agrupando tecnologias e ferramentas. Estes grupos são diversificados a fim de estabelecer um sistema integrado, considerando também clientes, operações e sistemas de produção. Os nove elementos são: big data; robôs autônomos; simulação; integração de sistemas horizontais e verticais; internet das coisas; ciber segurança; manufatura aditiva; realidade aumentada; nuvem de armazenamento de dados.

Em uma perspectiva diferente, define-se a estrutura da indústria 4.0 focado nos Sistemas Ciber Físicos e na Internet das Coisas, bem como virtualização, modularidade, operação em tempo real e interoperabilidade dos serviços. (Oztemel et al., 2020).

A Indústria 4.0 pode também ser assumida como Sistemas Ciber Físicos, com base em dados heterogêneos e integração de conhecimento. E pode ser resumida como um processo de fabricação Inter operável, integrado, adaptado, otimizado, orientado a serviços, correlacionado com algoritmos, com Big Data (BD), com altas tecnologias da Internet das Coisas (IoT) e Serviços (IoS), Automação Industrial, Ciber segurança (CS), Computação em Nuvem (CC) ou Robótica Inteligente (Alcácer et al., 2019).

Ainda na avaliação de Alcácer, desde o surgimento da I4.0, a comunidade de pesquisa experimentou diferentes abordagens sobre a mesma, e existe uma necessidade de esclarecimento de conceitos e tecnologias relacionados a I4.0.

### **2.3.1 Definição das tecnologias digitais da I4.0**

A partir da pesquisa realizada para a fundamentação teórica, levantou-se as principais definições para cada tecnologia digital encontrada, com o intuito de demonstrar os conceitos de cada uma delas, bem como apresentar um *framework* atualizado das tecnologias digitais. Cabe ressaltar que a pesquisa em questão não tem como foco principal o detalhamento dos componentes que formam cada *Cyber Physical Systems*, mas sim avaliar a contribuição da metodologia do TPM nas novas tecnologias digitais.

#### **2.3.1.1 Additive Manufacturing (3D ou AM)**

A manufatura aditiva (AM) envolve o processo de união de materiais em sucessivas camadas para criar objetos a partir de dados de modelo 3D (Lista Rossetti et al., 2023).

As técnicas de AM permitem a produção de peças físicas diretamente baseado em modelos digitais tridimensionais (3D). O objeto físico é gerado adicionando progressivamente finas camadas de material, umas sobre as outras, de acordo com a geometria do modelo digital. Materiais como polímeros, cerâmicas e ligas metálicas podem ser usados em tais processos (Alessio et al., 2023).

#### **2.3.1.2 Artificial Intelligence (AI)**

Inteligência Artificial (AI) é um campo mais amplo de tecnologias digitais que inclui aspectos de inteligência como percepção, sensação, raciocínio e representação do conhecimento adquirido (planejamento, operação, adaptação e prognósticos) para operacionalizar sistemas ciber-físicos (Jan et al., 2022).

Segundo Thayyib et al. (2023), a IA é definida como a ciência de fazer máquinas inteligentes, capazes de modelar padrões de comportamento humano e superar a aprendizagem humana e a resolução de problemas. Uma máquina com

experiência e intuição, um subconjunto de tecnologias que detecta, entende, aprende e age sobre dados interpretados, um algoritmo que executa funções perceptivas, cognitivas e de interação. Ou simplesmente, é um sistema que usa inteligência semelhante à humana.

#### 2.3.1.3 Augmented Reality (AR)

Realidade Aumentada (AR) é um termo que se refere a qualquer método que adicione elementos, itens ou informações virtuais, em tempo real, dentro do mundo físico e/ou virtual. A tecnologia não se limita apenas a elementos visuais, mas inclui áudio ou outros sentidos do usuário (Akbari et al., 2022).

Segundo Reljić et al. (2021), a AR é uma tecnologia para criar uma realidade digital, na qual o usuário e o ambiente físico são complementados com conteúdo digital adicional, como mensagens de texto, imagens, objetos virtuais 3D, vídeos, entre outros. Em alguns casos, a sensação também pode ser experimentada pelo tato, audição e olfato.

#### 2.3.1.4 Automation and Robots

Automação e robôs industriais referem-se a máquinas e equipamentos para automatizar os processos operacionais (Lista Rossetti et al., 2023).

Ribeiro et al. (2021) explicam que a Automação e Robôs, ou Automação Robótica de Processos - Robotic Process Automation (RPA) é a automação de tarefas que reproduzem o trabalho feito por humanos. A automação é feita com a ajuda de robôs, programações em softwares ou com suporte da Inteligência Artificial (IA), que são capazes de realizar tarefas repetitivas com precisão. As instruções destas tarefas são definidas pelo desenvolvedor, usando formas de programação e definição de variáveis.

Resumindo, o RPA é um termo abrangente para as ferramentas/dispositivos que operam na interface do usuário e de outras tecnologias digitais.

### 2.3.1.5 Big Data Analysis

Big Data Analysis (BDA) trata-se da implementação de tecnologias avançadas e algoritmos para obter insights e conectar as pessoas com a tecnologia. Big data facilita a tomada de decisões ao processar grandes volumes de dados empregando os modelos analíticos (Patil et al., 2023).

BDA inclui soluções tecnológicas que permitem o processamento e análise de dados estruturados e não estruturados para apoiar processos de tomada de decisão, através de processos executados com alta precisão, eficiência e velocidade, com pouca ou nenhuma intervenção humana. (De Oliveira-Dias et al., 2023).

### 2.3.1.6 Blockchain

Blockchain (BC) é uma estrutura de dados que é replicada e compartilhada entre os membros do grupo que estão distribuídos em uma rede. A propriedade fundamental de um BC é que seus membros possam transacionar, ou seja, fazer atualizações nos dados compartilhados (Bovenzi et al., 2023).

A tecnologia Blockchain é um exemplo significativo de descentralização no domínio dos sistemas de informação. Isso é possível utilizando um livro-razão distribuído que é mantido por vários nós, cada um verificando e registrado transações. Em uma rede *blockchain*, os dados são replicados e armazenado em vários nós, tornando-o altamente resistente ao fechamento, quedas ou corrupção (Lupi et al., 2023).

### 2.3.1.7 Cloud Computing (CC) ou Cloud Data Centers (CDC)

A computação em nuvem é um modelo de serviço “elástico” e de pagamento sob demanda que oferece computação e armazenamento aos locatários, através da Internet. Os serviços em nuvem são fornecidos na forma de plataformas, software ou infraestrutura por meio de virtualização de recursos físicos. Os locatários podem acessar a computação e seus recursos de qualquer lugar, eliminando a necessidade de uma infraestrutura de TI (Tecnologia da Informação) (Ullah et al., 2023).

Para Battaglia et al. (2023), a computação em nuvem é uma funcionalidade online que permite o acesso comum (sob demanda) a dados, graças a uma rede de

recursos altamente distribuídos em todo o sistema de produção e até mesmo ao longo de toda a cadeia de valor.

### 2.3.1.8 Cyber Security Systems (CPS)

A segurança cibernética é uma disciplina fundamental devido seu papel em proteger os usuários e as tecnologias que compõem o próprio CPS, suas informações e as infraestruturas de comunicações. As questões de segurança cibernética incluem ações de restrições de resposta, controle de disponibilidade, previsibilidade e confiabilidade das tecnologias digitais (Rosado et al., 2022).

Strupczewski et al. (2021) entendem o CPS como a capacidade de lutar contra crime cibernético no local de trabalho ou em outro campo de pesquisa onde o risco cibernético e segurança do trabalho se reúnem. São ações operacionais associadas ao desempenho de atividades no ciberespaço, que protegem ativos de informação, recursos das tecnologias digitais e ativos tecnológicos, evitando danos materiais a bens tangíveis e ativos intangíveis de uma organização, a interrupção de negócios ou ameaças físicas aos recursos de TI dentro da organização.

Nugraha e Martin (2022) apresentam os 5 requisitos técnicos para identificar e mitigar ataques cibernéticos, melhoraram a Ciber Segurança. Estes requisitos são apresentados no quadro da Figura 8.

Figura 8 – Requisitos Técnicos de Identificação e Combate ataques Cibernéticos

| Requisitos                                       | Descrição                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Firewalls de limite e <i>gateway</i> de Internet | Informações, aplicativos e computadores dentro da organização, devem ser protegidos contra acesso e divulgação não autorizados da internet, usado <i>firewalls</i> de limites, <i>gateways</i> ou dispositivos de rede equivalentes. |
| Configurações seguras                            | Os computadores e dispositivos de rede devem ser configurados para reduzir o nível de vulnerabilidades inerentes e fornecer apenas os serviços necessários para cumprir sua função.                                                  |
| Controle de acesso do usuário                    | Contas de usuário, especialmente aquelas com privilégios de acesso especiais (por exemplo, contas administrativas); devem ser atribuídas apenas a indivíduos autorizados, geridas de forma eficaz e                                  |

|                                                      |                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                      | fornecer o mínimo de nível de acesso a aplicativos, computadores e rede.                                                                                         |
| Proteção contra <i>malware</i> (software malignos)   | Os computadores expostos à Internet devem ser protegidos contra infecções por <i>malware</i> , através do uso de software de proteção contra <i>malware</i> .    |
| Gerenciamento de patches (atualizações de segurança) | O software está sendo executado nos computadores e os dispositivos de rede devem ser mantidos atualizados e ter as últimas atualizações de segurança instaladas. |

Fonte: Nugraha e Martin (2022).

### 2.3.1.9 Machine Learning

Aprendizado das máquinas é considerado parte integrante do ecossistema IoT e é considerada uma tecnologia digital, definida como uma comunicação que permite que dispositivos se conectem entre si, através de uma rede de comunicação com ou sem fio, sem a necessidade de intervenção humana. Sensores inteligentes, com avançada tecnologia e software de computação autônoma, são usados para ajudar um dispositivo de rede compreender e transmitir dados para a tomada de decisões em um sistema máquina para máquina (M2M) (Djehaiche et al., 2023).

Aprendizado das máquinas é uma convergência de estatística e ciência da computação em que as máquinas aprendem a melhorar o desempenho a partir de sua experiência anterior, de maneira semelhante aos humanos. A única diferença é que os computadores aprendem com os dados e os humanos aprendem com situações e experiências. O aprendizado de máquina consiste em 3 tipos de aprendizado: aprendizagem supervisionada; aprendizagem não supervisionada; por reforço.

1. O aprendizado supervisionado acontece quando os dados são acompanhados e fornecidos ao computador como entrada. A máquina aprende padrões e tenta prever o padrão de dados recém-fornecidos.
2. O Aprendizado não supervisionado não vem com dados e a máquina então que estudar os padrões dos dados e agrupá-los em grupos de acordo com as características dos dados.

3. O aprendizado por reforço trabalha com o conceito de teoria da recompensa; de um determinado estado, uma máquina se move e avança se a solução estiver correta ou volta ao estado anterior se a solução estiver errada (Rasheed et al, 2021).

#### 2.3.1.10 QR Code - RFID

O código QR (*Quick Response*) é uma tecnologia de armazenamento de dados, eficaz na transmissão de informações e amplamente utilizada em diversas aplicações, incluindo rastreabilidade de produtos, pagamento móvel, publicidade, geração de diplomas e transcrições, verificação de passaporte, entre outros. O código QR é definido em duas dimensões, 40 versões de símbolos (para transportar várias cargas de dados) e 4 níveis de correção de erros (ECL) selecionáveis pelo usuário: L, M, Q e H, que podem corrigir até 7%, 15%, 25% e 30%, respectivamente, quando atacado por desfiguração (Dey et al., 2022).

As Etiquetas RFID referem-se a uma “*Tag*” de identificação usado para transferir seus dados através de ondas eletromagnéticas. Essas *tags* são fixadas nos objetos e podem ser rastreados com o uso de receptores de ondas eletromagnéticas. As informações armazenadas eletronicamente estão contidas em etiquetas RFID. Ela vai transmitir dados através de ondas de rádio para o receptor (Shrivastava et al., 2023).

#### 2.3.1.11 Simulation and Modeling

Simulação e modelagem possuem uma ampla variedade de uso, como estimar propriedades, modelar situações reais, determinar modelos estatísticos para situações reais em que algoritmos para computação são aplicados e demonstrar os resultados (Debruine et al., 2021).

A simulação e modelagem são aspectos importantes na era digital. A simulação e modelagem permitem que o modelo virtual interaja bidireccionalmente com o modelo físico em tempo real. Os dados necessários para esta interação, são inseridos em um middleware IoT, e outros os sistemas podem ter acesso a esses dados. A simulação e modelagem utilizam dados coletados em tempo real do

sistema físico e podem ser inseridos diretamente através de transmissão de dados via rede, demonstrando os resultados (Liu et al., 2021).

#### 2.3.1.12 *Virtual Reality* (VR)

Realidade Virtual (VR) refere-se à tecnologia que permite os usuários entrarem e interagirem com um computador em um ambiente gerado pelo mesmo. VR é uma simulação do mundo real ou de um mundo imaginário, na qual permite os usuários criarem situações ou aprendizagens na medida em que eles percebem o mundo virtual como real (Akbari et al., 2022).

Segundo Simonetto et al. (2022), a VR nos dá a oportunidade de criar um ambiente tridimensional onde os usuários podem interagir eficientemente com objetos tridimensionais em tempo real usando seus sentidos naturais e habilidades.

### 2.3.2 Consolidação das Principais Tecnologias Digitais

Após a apresentação das definições e referências das principais tecnologias digitais da I4.0, apresenta-se a consolidação resumida das mesmas como contribuição e elementos utilizados para a realização da presente pesquisa. A Figura 9 apresenta um quadro contendo essa Consolidação.

Figura 9 – Definições das Tecnologias Digitais

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><i>Additive Manufacturing</i></b>  | Manufatura Aditiva (3D) refere-se à construção de objetos através da deposição de camada por camada, a partir de materiais base diversos, utilizando modelos criados em software de CAD 3D ( <i>Computer Aided Design</i> - Tridimensional).                                              |
| <b><i>Artificial Intelligence</i></b> | Inteligência Artificial (IA) é a simulação de processos de inteligência humana por meio de algoritmos e modelos computacionais, permitindo que máquinas realizem tarefas cognitivas, aprendam com dados e tomem decisões.                                                                 |
| <b><i>Augmented Reality</i></b>       | Realidade Aumentada (AR) é composta por uma série de dispositivos com tecnologias digitais que enriquecem a percepção sensorial do ser humano através do acesso a ambientes virtuais <b>acrescentando imagens</b> e corrigindo distorções, promovendo interatividade ao ambiente de forma |

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      | "não física".                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b><i>Automations and Robots</i></b> | Automação e robôs referem-se a máquinas e equipamentos para automatizar processos industriais operacionais variados, através de interface com programação humana e/ou aprendizado das máquinas, com consciência do ambiente e adaptação à cenários inesperados.                                                                         |
| <b><i>BIG DATA Analysis</i></b>      | <i>Big Data Analysis</i> refere-se à coleta e análise de grande quantidade de dados disponíveis, usando uma série de técnicas para filtrar, capturar, extrair informações, identificar padrões, tendências e insights para tomada de decisões estratégicas.                                                                             |
| <b><i>Blockchain</i></b>             | <i>Blockchain</i> é uma tecnologia de registro que utiliza criptografia para criar e manter um registro seguro e imutável de transações, oferecendo transparência e segurança. É utilizada para qualquer tipo de transferência digitalizada de informações.                                                                             |
| <b><i>Cloud Computing</i></b>        | Computação na Nuvem é a aplicação baseada na Web, cujas informações são transmitidas e armazenadas em tempo real ( <i>online</i> ), em servidores externos e descentralizados, para facilitar o arquivamento e processamento de grandes quantidades de dados. Com aplicabilidade diversa, permite ganhos de eficiência e flexibilidade. |
| <b><i>Cyber Security Systems</i></b> | Sistemas de Ciber Segurança referem-se à tecnologias e práticas para proteger sistemas, redes e dados contra as ameaças cibernéticas, incluindo ataques, roubo de dados e comprometimento da integridade.                                                                                                                               |
| <b><i>Machine Learning</i></b>       | Aprendizado das Máquinas (M2M) é um ramo da inteligência artificial que capacita sistemas, através da coleta de dados para identificar padrões, realizar troca de dados e informações, correções e tomar decisões sem serem explicitamente programados, melhorando sua performance de forma autônoma.                                   |
| <b><i>QR Code</i></b>                | <i>QR Code</i> é um código de barras bidimensional que armazena informações, podendo ser rapidamente escaneado por dispositivos com tecnologia digital para leitura do código de barras bidimensional.                                                                                                                                  |

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>RFID</b>                           | RFID é uma tecnologia de radiofrequência para identificar e rastrear elementos, facilitando a coleta de dados de forma automatizada e em tempo real.                                                                                                     |
| <b><i>Simulation and Modeling</i></b> | Simulação e Modelagem são utilizadas para criar uma representação digital de sistemas, modelos ou processos do mundo físico em ambiente virtuais e permitir otimizar as configurações para obtenção de resultados e propriedades do modelo implementado. |
| <b><i>Virtual Reality</i></b>         | Realidade Virtual (VR) é composta por uma série de dispositivos com tecnologias digitais que cria um ambiente digital imersivo, que simula a presença física desejada, promovendo interatividade e avaliações para uma melhor tomada de decisão.         |

### 2.3.3 Definição dos *Design Principal* (arranjos construtivos)

As tecnologias apresentadas nos permitem operacionaliza-las e utiliza-las com vários modelos e arranjos, os quais os cinco principais e citados arranjos construtivos são apresentados a seguir. Para a utilização das tecnologias digitais abordadas neste capítulo, que compõem o Sistema Ciber Físico, existe um elemento chamado “Design Principal”, ou principais modelos, principais construções, principais arranjos de montagens e de funcionamento das tecnologias digitais que compõem o IoT.

Os Principais “*Design Principal*” pesquisados são:

- a) Interoperabilidade;
- b) Descentralização;
- c) Virtualização;
- d) Tempo Real de Capacidade;
- e) Modularidade.

#### 2.4.3.1 Interoperabilidade (*Interoperability*)

Interoperabilidade é a capacidade de dois ou mais sistemas se entenderem. Também se refere à capacidade de compartilhar informações e conhecimento. A interoperabilidade irá sintetizar soluções de aplicativos, processos de negócios e contexto de negócios. Oito princípios são necessários para que as tecnologias

digitais da I4.0 sejam interoperáveis, nomeadamente: acessibilidade, multilinguismo, segurança, privacidade, subsidiariedade, utilização de normas abertas, software de fonte aberta e soluções multilaterais. O fator principal da interoperabilidade é garantir uma comunicação profunda e prescrição clara do conjunto comum de dados com capacidades necessárias que devem estar ligadas a todos sistemas de informação que desejam interoperar em um determinado nível de sofisticação (Frederico et al., 2023).

#### 2.4.3.2 Descentralização (*Decentralization*)

Descentralização é onde cada transação na rede é feita, apenas por dois nós por vez e de validação de terceiros. A descentralização permite que a cadeia de blocos operacionais não dependa de uma autoridade central. A aplicação de possíveis recursos descentralizados representa a abordagens em vários níveis e em quaisquer componentes da Internet e suas novas tecnologias digitais, por exemplo, protocolos descentralizados, aplicativos e infraestrutura (Zarrin et al., 2021).

#### 2.4.3.3 Virtualização (*Virtualization*)

A Virtualização permite a implementação de ambientes virtuais gráficos que não dependem de hardware dedicado, chamado de dispositivos físicos, para executar uma infinidade de funções. Além disso, serviços de rede complexos podem ser criados através de conexão de múltiplas funções de redes virtualizadas, formando uma Cadeia de Função de Serviço (SFC) e uma infinidade de aplicações (Fulber-Garcia et al., 2023).

#### 2.4.3.4 Tempo Real de Capacidade (*Real Time Capability*)

A capacidade em tempo real é um requisito de transmissão de dados para tomada de decisão descentralizada e com virtualização através da utilização das novas tecnologias digitais. Para criar um CPS virtualizado, o cruzamento entre um ambiente digital, coleta de dados e processamento de dados em tempo real, pelo contínuo monitoramento do produto ou processo, é usado para reduzir o tempo de reação e aumentar a produtividade (Davis. et al., 2020).

#### 2.4.3.5 Modularidade (*Modularity*)

A modularidade oferecida pelas tecnologias leves de containerização (processo de implantação de *software* que agrupa códigos de uma aplicação com todos os arquivos e bibliotecas necessárias) é a capacidade de encapsular funcionalidades em módulos com granularidade personalizável. Em contraste com as arquiteturas monolíticas, o paradigma de containerização leve promove a adoção de componentes modularizados mais refinados, cada um especializado em uma área-tarefa, aplicando os princípios de programação de baixo acoplamento/alta coesão.

A modularidade proporciona soluções refinadas e softwarizadas de controle industrial e implementa sobre eles uma orquestração automatizada do circuito geral de controle do processo (Di Modica et al., 2023).

### 2.4 CONCEITO DE *FRAMEWORK*

O *Framework* é uma estrutura que classifica os fatores importantes no desenvolvimento de sistemas de informação. Esses fatores são conectados com o desenvolvimento de sistemas de pesquisas, sendo uma representação teórica resultante da revisão da literatura sobre os assuntos abordados (Aparicio et al., 2015).

O conhecimento adquirido com os resultados da revisão da literatura e conceitos relacionados leva ao desenvolvimento de uma estrutura teórica para aprimorar o conhecimento dos pesquisadores para mais estudos. O *Framework* também se destina a servir como uma explicação e previsão de uso que pode orientar os profissionais ao adotar e implementar essa estrutura (Nord et al., 2019).

Um *Framework* teórico é uma lógica conjunta de conceitos desenvolvidos e conectados a partir de uma ou mais teorias, que um pesquisador cria para estruturar um estudo. Para criar uma estrutura teórica, o pesquisador deve definir quaisquer conceitos e teorias que fornece o embasamento da pesquisa, uni-los através de conexões lógicas e relacionar esses conceitos com o estudo que está sendo realizado.

Em suma, um *framework* é um quadro teórico e um reflexo de um trabalho em que o pesquisador se envolve para usar uma teoria em um determinado estudo (Varpio et al., 2020).

#### **2.4.1 *Framework* das Tecnologias Digitais I4.0**

A transição para a I4.0 é percebida como uma mudança de paradigma, uma mudança de enormes dimensões como a que foi experimentado com as revoluções industriais anteriores.

Como tal, a implementação eficaz de muitas das mudanças projetadas nos sistemas de produção está longe de ser óbvias ou simples. As Indústrias são obrigadas a transformar seus processos, práticas, instalações e equipamentos para apoiar esta transformação, e também trabalhar na requalificação dos seus profissionais para lidar com novas tecnologias e processos de trabalho (Silva et al., 2020).

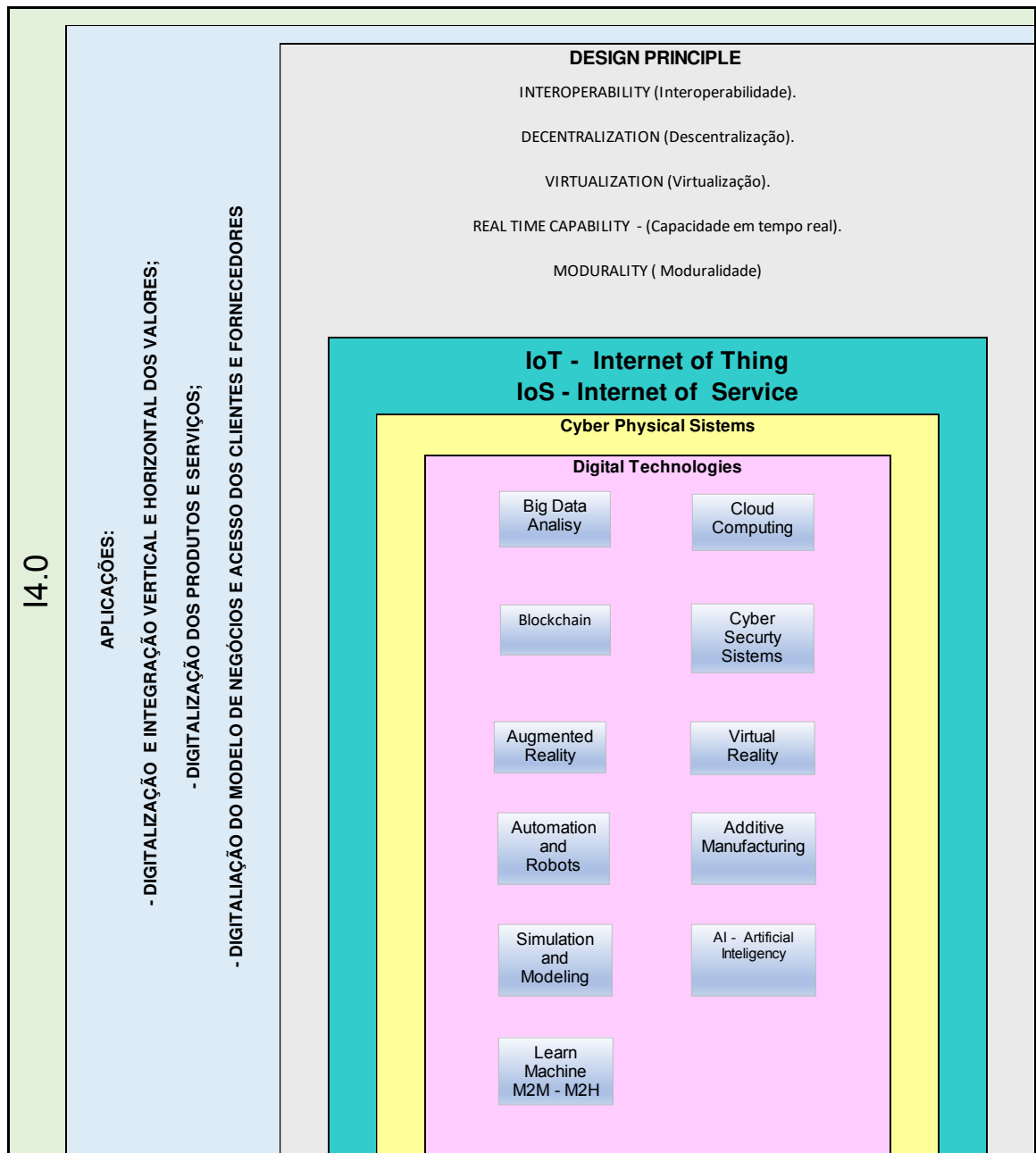
Como forma de representar esta transformação, na Figura 10, é apresentado um modelo de *Framework* das tecnologias digitais da indústria 4.0, construído pelo autor da presente pesquisa, tendo sua representatividade a partir da camada interna para as camadas externas. Isso visa um melhor entendimento e demonstração das tecnologias digitais estruturantes, da formação do Sistema Ciber Físico, da composição da Internet das Coisas (IoT) e a Internet dos Serviços (IoS), dos principais modelos de arranjo de montagem das tecnologias e das aplicações nas industriais e processos de fabricação.

Para melhor representar a variedade de classificação das tecnologias digitais estruturantes da I4.0, foi criada a Tabela 01, visando ilustrar as diversas abordagens nos artigos que contemplam as tecnologias digitais da Indústria 4.0.

Tabela 1 – Variedade de citações das tecnologias digitais.

| <b>Tecnologias (Cyber Physical Systems)</b> | Lardo<br>2020 | Bellantuono<br>2021 | Salvadorinho<br>2021 | Panagou<br>2021 | Silva<br>2020 | Butt,<br>2020 | Sacomano<br>2018 | Aceto<br>2019 | Raj<br>2020 | Saucedo-Martínez<br>2018 | Oztemel<br>2020 | Alcácer<br>2019 | %<br>Citações |
|---------------------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|-----------------|---------------|---------------|------------------|---------------|-------------|--------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| <i>Additive Manufacturing</i>               | X             | X                   |                      |                 | X             | X             | X                |               | X           | X                        | X               | X               | 75%           |
| <i>Artificial Inteligency</i>               |               |                     |                      |                 | X             | X             | X                |               | X           |                          |                 |                 | 33%           |
| <i>Augmented Reality</i>                    | X             | X                   |                      |                 | X             |               | X                |               | X           | X                        | X               | X               | 66%           |
| <i>Automations and Robots</i>               | X             |                     |                      | X               |               | X             | X                | X             | X           | X                        |                 | X               | 66%           |
| <i>BIG DATA Analysis</i>                    | X             | X                   | X                    |                 | X             | X             | X                | X             | X           | X                        | X               | X               | 92%           |
| <i>Block Chain</i>                          |               |                     |                      | X               |               |               |                  | X             |             |                          |                 |                 | 17%           |
| <i>Cloud Computing</i>                      | X             | X                   |                      |                 | X             | X             | X                | X             | X           |                          | X               | X               | 75%           |
| <i>Cyber Security Systems</i>               |               | X                   |                      |                 | X             | X             | X                |               |             | X                        |                 | X               | 50%           |
| <i>Machine Learning</i>                     |               |                     |                      |                 | X             |               | X                |               | X           |                          | X               |                 | 33%           |
| <i>QR Code</i>                              |               |                     |                      |                 | X             |               | X                |               |             |                          |                 |                 | 17%           |
| <i>RFID</i>                                 |               |                     |                      |                 | X             |               | X                |               | X           |                          |                 |                 | 25%           |
| <i>Simulation and Modeling</i>              | X             | X                   |                      |                 |               | X             |                  |               |             | X                        |                 | X               | 42%           |
| <i>Virtual Reality</i>                      |               |                     |                      |                 | X             |               | X                |               |             |                          |                 |                 | 17%           |

Figura 10 - *Framework* Tecnologias Digitais das I4.0



### 3 METODOLOGIA

Nesta etapa da pesquisa, foram apresentados os métodos para analisar a contribuição da metodologia do TPM como suporte à Indústria 4.0 (I4.0) na fabricação mecânica. Inicialmente foi apresentada a caracterização da pesquisa, através dos conceitos que serão aplicados. Posteriormente, um fluxograma metodológico foi apresentado para orientar todas as etapas que envolvem o trabalho. Por fim, foi apresentado um detalhamento das atividades que foram realizadas e a dinâmica utilizada para a pesquisa de campo qualitativa.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Conforme Fonseca (2002), uma pesquisa possibilita um entendimento da realidade a ser investigada como um processo permanentemente inacabado. A pesquisa se processa através de aproximações sucessivas da realidade, fornecendo informações para a ação real. Na visão de Gerhardt (2009), a pesquisa é um procedimento sistemático e intensivo que tem como objetivo descobrir e interpretar os fatos que estão sendo estudados em uma determinada realidade.

A presente pesquisa trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, utilizando os conhecimentos do TPM nas tecnologias digitais da Indústria 4.0 e com caráter qualitativo.

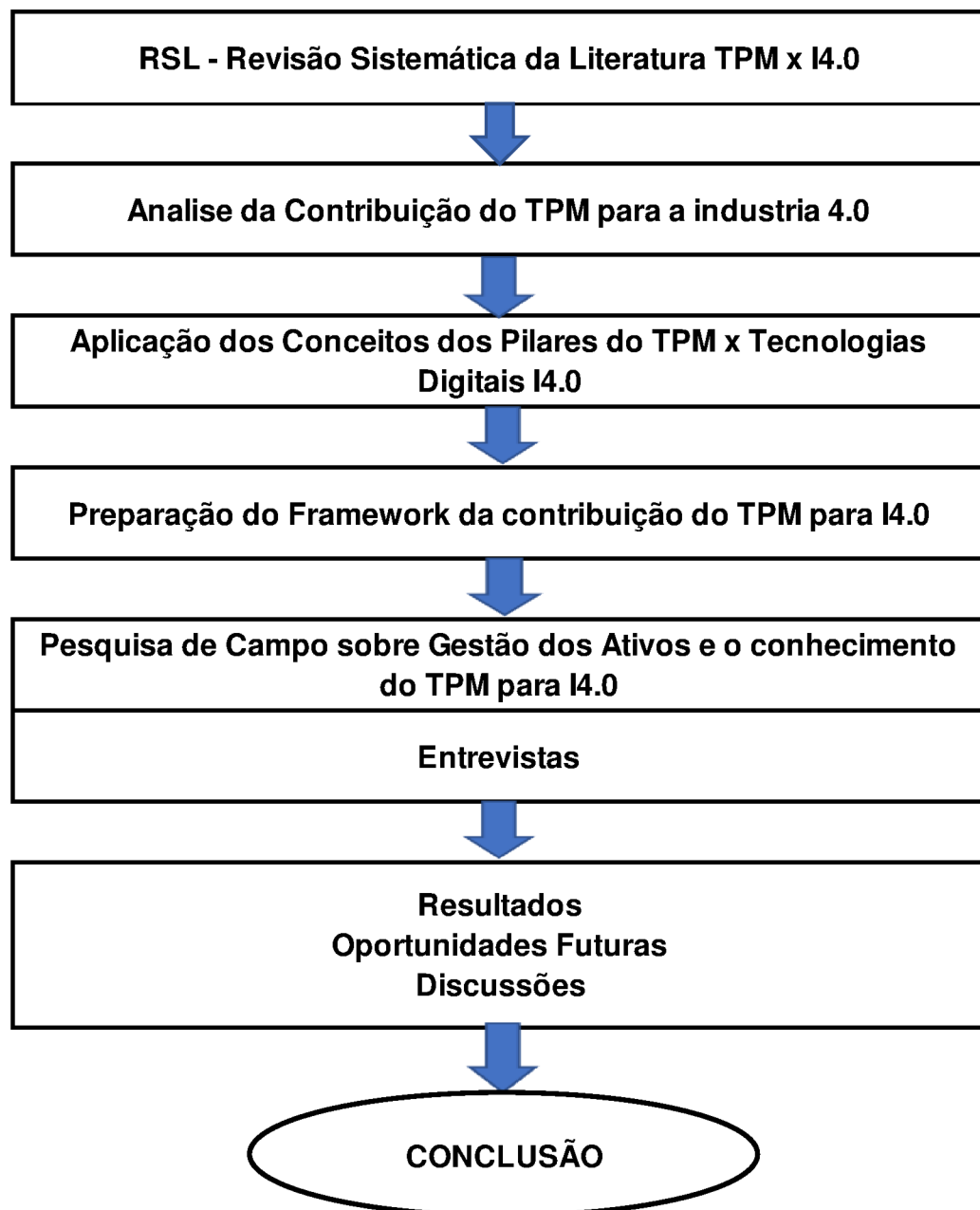
Conforme Gil, e com bases nos objetivos descritos, uma pesquisa qualitativa exploratória visa proporcionar uma maior familiaridade com a realizada pesquisada, com o intuito de torna-la mais explícita. As etapas que envolve este tipo de pesquisa são: a) levantamento bibliográfico, b) entrevistas e análise de dados que estimulem a compreensão. Para Gerhardt (2009), na pesquisa qualitativa, o desenvolvimento da pesquisa é imprevisível. O objetivo da amostra é de produzir informações aprofundadas e ilustrativas. Seja a informação pequena ou grande, o que importa é que ela seja capaz de identificar oportunidades de aplicação do tema e que ajudem a compreender a situação, possibilitando a utilização deste conhecimento.

O Estudo de caso, conforme classificação de procedimento metodológico de uma pesquisa, procura compreender como é o mundo do ponto de vista do participante, apresentando uma perspectiva completa e coerente do objeto de estudo, do ponto de vista do investigador (Fonseca, 2002).

### 3.2 ETAPAS DA PESQUISA

As etapas das pesquisas, apresentadas no fluxograma da Figura 11, e detalhadas nos tópicos seguintes, tem como intuito orientar e detalhar as etapas da pesquisa até a apresentação dos resultados.

Figura 11 - Etapas da Pesquisa.



### 3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura TPM Vs I4.0.

Através de uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), com base no objetivo geral e nos objetivos específicos, a pesquisa procurou responder as questões motivadoras para o trabalho científico em questão:

1. Qual a contribuição da metodologia da TPM - Manutenção Produtiva Total nos processos de fabricação mecânica na indústria 4.0?
2. Como a aplicação da metodologia do TPM nas tecnologias digitais (I4.0), podem contribuir com o processo de fabricação?

Através as palavras chaves TPM, Industria 4.0 e suas tecnologias (*Additive Manufacturing, Artificial Intelligence, Augmented reality, Automation and Robots, Big Data Analytics, Blockchain, Cloud Computing, Cyber Security Systems, Machine Learning, QR Code, RIFD, Simulation and Modeling, Virtual Reality*), foram estabelecidos os critérios para realizar a RSL. O quadro da Figura 12 mostra esses critérios.

Figura 12 - Protocolo RSL

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Palavras Chaves</b>        | <b>GRUPO 01</b> - TPM e I4.0                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                               | <b>Grupo 02</b> - TPM e tecnologias digitais ( Additive Manufacturing, Artificial Intelligence, Augmented reality, Automation and Robots, Big Data Analytics, Blockchain, Cloud Computing, Cyber Security Systems, Machine Learnig, Qr Code, RIFD, Simulation and Modeling, Virtual Reality) |
| <b>Banco de Dados</b>         | Scopus                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                               | Web of Science                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Operador Booleano</b>      | OR entre as palavras do grupo 01; OR entre as palavras do Grupo 02; E entre os Grupos 01 e 02.                                                                                                                                                                                               |
| <b>Crítérios de Exclusão</b>  | Artigos Duplicados;<br>Artigos com escopo diferente de Engenharia, Ciência da Computação e Decisões Científicas.                                                                                                                                                                             |
| <b>Linguagem</b>              | Inglês                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Tipo de Publicação</b>     | Artigosde periódicos,                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Janela de Oportunidade</b> | 2020 - 2024.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

Para a execução da revisão sistemática da literatura, foram consultados os bancos de dados Scopus e Web of Science, com a aplicação dos critérios apresentados e através das palavras chaves do Grupo 01 e Grupo 02, foram encontrados os seguintes resultados.

Para as palavras do grupo 01, TPM e I4.0, foram encontrados na pesquisa 12 artigos relacionados e todos foram avaliados. Já para as palavras do Grupo 02, foram encontradas abordagens específicas para as aplicações das tecnologias digitais não relacionadas à gestão de manutenção e ao TPM.

A Tabela 2 apresenta o quantitativo dos artigos encontrados, além dos artigos duplicados, dos artigos descartados e os artigos que foram avaliados. Os artigos que mais colaboraram com a pesquisa, estão representados na Tabela 03, apresentada nos resultados deste trabalho.

Tabela 2 – Resultado da pesquisa da RSL.

| Pesquisa                       | Qt Artigos | Duplicados | Descartados | Avaliados | % Avaliada |
|--------------------------------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| TPM Vs I4.0                    | 12         | 0          | 0           | 12        | 100,00%    |
| TPM Vs Additive Manufacturing  | 3          | 0          | 0           | 3         | 100,00%    |
| TPM Vs Artificial Inteligency  | 16         | 7          | 4           | 5         | 31,25%     |
| TPM Vs Augmented Reality       | 3          | 0          | 2           | 1         | 33,33%     |
| TPM Vs Automations and Robots  | 21         | 5          | 15          | 1         | 4,76%      |
| TPM Vs BIG DATA Analysis       | 50         | 16         | 27          | 7         | 14,00%     |
| TPM Vs Block Chain             | 23         | 0          | 23          | 0         | 0,00%      |
| TPM Vs Cloud Computing         | 189        | 71         | 116         | 2         | 1,06%      |
| TPM Vs Cyber Security Systems  | 20         | 4          | 12          | 4         | 20,00%     |
| TPM Vs Machine Learning        | 43         | 0          | 35          | 8         | 18,60%     |
| TPM Vs QR Code                 | 3          | 0          | 0           | 0         | 0,00%      |
| TPM Vs RFID                    | 0          | 0          | 0           | 0         | 0,00%      |
| TPM Vs Simulation and Modeling | 81         | 29         | 52          | 0         | 0,00%      |
| TPM Vs Virtual Reality         | 2          | 0          | 1           | 1         | 50,00%     |

### 3.2.2 Análise da Contribuição do TPM para a Industria 4.0

Após a RSL, foi realizada uma análise dos métodos utilizados pelo TPM, que identificou as práticas que melhor contribuem com as tecnologias digitais que suportam a indústria 4.0, visando sua aplicação para cada tecnologia digital encontrada e de forma a melhorar o desempenho e a confiabilidade dos componentes.

No decorrer desta etapa, a RSL auxiliou para um melhor entendimento de cada uma das tecnologias encontradas e suas possíveis aplicações, permitindo desta forma analisar as possibilidades de contribuição do TPM para a I4.0 e subsidiar de informações a etapa subsequente da presente pesquisa, que foi a análise da aplicação dos conceitos do TPM nas tecnologias digitais.

### **3.2.3 Aplicação dos conceitos do TPM Vs Tecnologias digitais da I4.0**

A sequência da análise da contribuição do TPM para a I4.0 se deu através de seus oito pilares, onde foram identificadas as atividades de cada pilar que poderiam ser utilizados como suporte às tecnologias digitais da I4.0.

Esta identificação permitiu relacionar com maior detalhe a contribuição e suporte que a metodologia do TPM pode proporcionar para a indústria 4.0, na fabricação mecânica.

### **3.2.4 Preparação do *Framework* da contribuição do TPM para a I4.0**

Com o detalhamento das atividades dos pilares do TPM que contribuem para as tecnologias digitais, foram preparados *frameworks* individuais de cada tecnologia digital de modo a facilitar a identificação da aderência de cada pilar com cada tecnologia.

Adicionalmente, foi criado um *Framework* relacionando os pilares do TPM e suas respectivas atividades com as contribuições para cada tecnologia digital, demonstrando assim um dos objetivos específicos da pesquisa.

### **3.2.5 Pesquisa de campo para identificação da Gestão dos Ativos e TPM para I4.0**

Com a intenção de identificar oportunidades de contribuição do TPM para as tecnologias digitais que fazem parte da I4.0, buscando um melhor controle e confiabilidade destas tecnologias digitais, foi realizada uma pesquisa de campo, com abordagem qualitativa em quatro empresas de diferentes segmentos e que utilizam as tecnologias digitais que compõem a Indústria 4.0. Essa pesquisa permitiu verificar o real entendimento das empresas sobre a gestão de ativos e o TPM, através das

rotinas de manutenção executadas, observando e compreendendo as ações executadas e propondo eventuais implementações de ações que utilizem a metodologia do TPM. Foi então demonstrado, de forma mais visível, o cenário atual das empresas consultadas na gestão da manutenção e apresentadas possibilidades de melhoria com a adoção de uma gestão de manutenção baseado no TPM.

Dentro das possibilidades e contatos com empresas que utilizam tecnologias digitais, através da pesquisa em questão, as quatro empresas, apesar de segmentos diferentes, tinham em comum a utilização de uma ou mais tecnologias digitais da I4.0. Empresas estas que são apresentadas a seguir com uma breve introdução de suas atividades.

#### 3.2.5.1 Empresas participantes

As empresas participantes da pesquisa qualitativa foram:

1. Gulmi Soluções Tecnologias Ltda.: Uma Startup, com atuação em Porto Alegre e Rio Grande e que atua no desenvolvimento e licenciamento de programas de computador customizados, bem como no aprimoramento de *softwares* que facilitem a coleta de dados. É uma prestadora de serviços de consultoria em tecnologias digitais (TI) para melhorar os processos de comunicação, transmissão de informação e análise de dados instantâneos. Sua especialidade é a aplicação e análise de grande transmissão de dados (*Big Data Analysis*) e de utilização da Inteligência Artificial (AI);
2. Vetorial Internet: Pioneira nos serviços de internet na região sul do Rio Grande do Sul (RS) - Brasil, sendo atualmente um dos maiores provedores de internet do RS, oferecendo soluções completas e integradas em telecomunicações e tecnologias da informação para o mercado corporativo e residencial. A empresa atua na área de acesso à Internet, hospedagem de dados, *websites*, provedores de aplicação *web*, serviços de telefonia IP, desenvolvimento de soluções corporativas especializadas em comunicação de dados, voz e desenvolvimento de sistemas de informação;
3. Gold Tornearia e Eletromecânica: Empresa de construção e montagem de equipamentos elétricos-eletrônicos, especializadas em obras de

terminais de armazenamento de combustível, com transmissão de sinais entre os locais de instalação até a sala de controle, onde são monitorados através de redes de comunicação por fibra ótica e avaliação dos dados encaminhados. Utilizam a transmissão de dados para acompanhar os dados operacionais e identificar as oscilações de sinais, os quais identificam falhas para que, desta forma, requererem uma manutenção ou até uma troca de equipamentos;

4. LUBRAC System Ltda: A Lubrac System é uma empresa voltada ao fornecimento de soluções técnicas para monitoramento e controle de fluídos, sistemas de lubrificação individual ou centralizado, sistema de filtragem de óleo. Além de uma linha completa de acessórios de selagem mecânica. A empresa tem atuação em indústrias petroquímicas, de energia, de petróleo, de papel e celulose, siderúrgicas, químicas leve ou pesada, entre outras. Além de fabricação própria, a empresa conta com uma ampla gama de fornecedores de reconhecida qualificação técnica.

#### 3.2.5.2 Contatos e Entrevistas

Através dos contatos iniciais, via telefone, onde foi apresentada a proposta da pesquisa em questão e esclarecida a utilização da metodologia do TPM, as quatro empresas que se mostraram interessadas em participar da pesquisa para o melhor entendimento de suas atividades de manutenção aplicáveis à I4.0. Para a realização das entrevistas, as empresas designaram um colaborador, que tem acesso e utiliza as tecnologias digitais.

Pela Startup Gulmi Soluções Tecnológicas, foi designado um sócio, especializado em desenvolvimento de *software* e suporte as grandes empresas do ramo, como Apple e Microsoft.

Para a Vetorial Internet, foi designado o Gerente de Suporte de Infraestrutura de TI.

Na empresa Gold Eletromecânica, foi designado o Gerente de Projetos e Implementação.

E na empresa Lubrac, foi designado o Analista de Suporte de TI.

Após a determinação das empresas e dos representantes das mesmas, foram agendadas reuniões presenciais com as empresas Gulmi Soluções Tecnológicas e Vetorial Internet. Já para as empresas Gold Tornearia e Eletromecânica e a Lubrac, foram agendadas reuniões virtuais. Em todas as situações, além das respostas ao questionário, foram esclarecidos e debatidos pontos que permitiram identificar uma visão real das atividades de manutenção existentes, visando enriquecer o conhecimento sobre o assunto e demonstrar possibilidades de melhorias, mesmo que inicialmente pequenas, mas que ajudariam no controle operacional, nos registros e na confiabilidade dos equipamentos.

No ato das reuniões presenciais ou virtuais, foram apresentadas as perguntas, sendo as mesmas realizadas de forma igualitária para todos os que participaram, enquanto os questionamentos complementares foram relacionados a gestão da manutenção, entendimento da metodologia do TPM, conhecimento das tecnologias digitais e a aplicação da manutenção atualmente de cada empresa.

Os questionamentos realizados foram todos registrados pelos próprios participantes, com o envio posterior do questionário apresentado e os comentários pertinentes às respostas. Assim com a autorização para sua utilização na pesquisa. O questionário da pesquisa realizada foi composto pelas seguintes questões:

- I. Quais os tipos de gestão de manutenção a empresa utilizam?  
☐ Corretiva.  
☐ Preventiva.  
☐ Preditiva.
- II. Quais são os indicadores utilizados para mensurar desempenho dos equipamentos? Demonstram melhora, sim ou não?
- III. Conhece ou já ouviu falar do TPM - Manutenção Produtiva Total e seus pilares?
- IV. O que é manutenção Planejada?
- V. O que é manutenção autônoma?
- VI. Conhece ou já ouviu falar da Indústria 4.0 ou 4ª Revolução Industrial?
- VII. Quais tecnológicas digitais utilizadas na Indústria 4.0 conhece?
- VIII. Existe manutenção nas tecnologias digitais utilizadas? Que tipo (vide questão 01)?

- IX. Como é identificado o bom funcionamento/resultado das tecnológicas digitais utilizadas?
- X. Através da gestão da manutenção, pode-se melhorar a eficácia das tecnologias digitais (I4.0) utilizadas na empresa?

Durante os questionamentos objetivos através das perguntas apresentadas, alguns pontos foram observados e questionamentos complementares foram realizados.

- i. Se existem, além dos controles operacionais identificados, controles/registros da gestão de manutenção?
- ii. Se as ações de manutenção são realizadas por times próprios de manutenção e se tem a rastreabilidade destas intervenções?
- iii. Mesmo seguindo as condições operacionais, se foram gerados planos de manutenção e determinados ciclos para aplicação?
- iv. As causas das falhas foram identificadas, registradas e melhorias foram sugeridas/implementadas para que não ocorra mais?
- v. Se trabalham com indicadores de manutenção por equipamento e seus registros?

Após esta etapa de coleta de informações, as respostas obtidas foram transcritas. Após essa transcrição, o conteúdo foi analisado e, em seguida, interpretado para que se obtenha o objetivo geral do trabalho. Foram criados quadros para melhor análise e interpretação dos resultados.

Todos os resultados da presente pesquisa, desde a RSL, são apresentados no capítulo seguinte.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa de acordo com a sequência apresentada anteriormente, no fluxograma da Figura 11.

### 4.1 RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

De acordo com o protocolo da Figura 12, foi realizada a RSL e seus resultados consolidados, de forma objetiva, apresentados na Tabela 02. Cabe ressaltar que, os principais autores, os quais apresentam as contribuições do TPM para a indústria 4.0, apresentam estas contribuições de forma diversificada para cada pilar do TPM e mantendo os conceitos básicos e a metodologia a ser aplicada nas tecnologias digitais da indústria 4.0.

Para o Pilar Melhoria Específica percebeu-se que a principal característica do pilar é a capacidade em identificar e solucionar problemas. Essa capacidade é complementada por ferramentas, registros e práticas internas. No Pilar Manutenção Autônoma, claramente a pesquisa mostra o foco no desenvolvimento do operador. No Pilar Manutenção Planejada, a pesquisa mostrou como foco principal a criação de controles dos equipamentos, seguido da elaboração de planos e rotinas, e posteriormente a proposição e implantação de melhorias. No Pilar Educação e Treinamento, o foco encontrado foi a disseminação do conhecimento técnico, tendo planos de treinamento como ferramenta de apoio para essa disseminação do conhecimento técnico. No Pilar Inicial, o foco se deu na identificação de melhorias que podem ser aplicadas nos novos equipamentos. Porém, foi apontado a necessidade de avaliação do custo-benefício destas melhorias. No Pilar Manutenção da Qualidade, o foco se deu na estratégia de acompanhamento do desempenho, na definição de métricas e, posteriormente, na aplicação de ferramentas da qualidade para identificar e solucionar problemas. No Pilar Administração, o foco maior foi na gestão dos objetivos administrativos, com a definição dos processos e na identificação das atividades que não agregam valor. Já no Pilar Segurança e Meio Ambiente, o foco principal foi na utilização de dispositivos de proteção, seguido da definição de padrões e procedimentos. A parte de descarte adequado de resíduos também foi consideravelmente apontado.

Tabela 3 – Práticas do TPM para Industria 4.0

| Pilar                            | Atividades -Contribuição TPM                                             | Shahoo<br>(2019) | Tortorella<br>(2022) | Samadhiya<br>(2023) | Medynski<br>(2023) | Tortorella<br>(2021) | Xiang<br>(2021) | %<br>citações |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|-----------------|---------------|
| <b>Melhoria Específica</b>       | - Registrar as condições operacionais do equipamento.                    |                  | x                    | x                   |                    | x                    |                 | 50%           |
|                                  | - Habilidade para identificar problemas e suas causas.                   | x                | x                    | x                   |                    | x                    |                 | 66%           |
|                                  | - Ferramentas de controles                                               | x                | x                    |                     |                    | x                    |                 | 50%           |
|                                  | - Roteiros de Inspeções                                                  | x                | x                    |                     |                    | x                    |                 | 50%           |
|                                  | - Grupos multidisciplinares                                              | x                | x                    |                     |                    | x                    |                 | 50%           |
|                                  | - Atualizar e sugerir melhorias                                          |                  | x                    |                     |                    | x                    |                 | 33%           |
| <b>Manutenção Autônoma</b>       | - Treinar os operadores                                                  | x                | x                    | x                   | X                  | x                    | x               | 100%          |
|                                  | - Check List                                                             |                  | x                    | x                   |                    | x                    |                 | 50%           |
|                                  | - Atividades Simples (ex.: limpeza)                                      | x                | x                    |                     | X                  | x                    | x               | 83%           |
|                                  | - Assegurar conexões de ligação ou interligação                          | x                | x                    |                     |                    | x                    |                 | 50%           |
|                                  | - Identificar inicialmente o problema                                    | x                | x                    | x                   | X                  | x                    | x               | 100%          |
|                                  | - Aumentar conhecimento.                                                 | x                | x                    | x                   | X                  | x                    | x               | 100%          |
| <b>Manutenção Planejada</b>      | - Avaliar e identificar situação atual dos equipamentos                  |                  |                      | x                   |                    |                      |                 | 17%           |
|                                  | - Criar ferramenta de controle                                           | x                | x                    | x                   | x                  | x                    | x               | 100%          |
|                                  | - Determinar criticidade dos equipamentos                                |                  | x                    | x                   |                    | x                    |                 | 50%           |
|                                  | - Estabelecer Planos e rotinas                                           |                  | x                    | x                   | x                  | x                    | x               | 83%           |
|                                  | - Aplicar técnicas de monitoramento                                      |                  | x                    | x                   |                    | x                    | x               | 66%           |
|                                  | - Avaliar e propor melhorias                                             |                  | x                    | x                   | x                  | x                    | x               | 83%           |
|                                  | - Treinamento contínuo dos colaboradores                                 |                  | x                    | x                   |                    | x                    |                 | 50%           |
| <b>Educação e Treinamento</b>    | - Gerar planos de educação e treinamento                                 |                  | x                    |                     | x                  | x                    | x               | 66%           |
|                                  | - Disseminar conhecimento técnico                                        | x                | x                    | x                   | x                  | x                    | x               | 100%          |
|                                  | - Capacitar os operadores                                                |                  |                      |                     | x                  |                      | x               | 33%           |
|                                  | - Treinar equipe para identificar anomalias                              |                  | x                    |                     |                    | x                    |                 | 33%           |
|                                  | - Visualizar e aplicar melhorias                                         |                  | x                    |                     |                    | x                    |                 | 33%           |
|                                  | - Reuniões Periódicas para discussão de avanços e atualizações           | x                | x                    | x                   |                    | x                    | x               | 83%           |
| <b>Controle Inicial</b>          | - Identificar melhorias que poderão ser aplicadas                        | x                | x                    |                     | x                  | x                    | x               | 83%           |
|                                  | - Criar grupos de desenvolvimento das facilidades de manutenção          | x                | x                    |                     |                    | x                    |                 | 50%           |
|                                  | - Identificar os custos diretos e indiretos                              |                  | x                    |                     | x                  | x                    | x               | 66%           |
|                                  | - Determinar a interatividade das tecnologias digitais                   |                  | x                    |                     |                    | x                    | x               | 50%           |
| <b>Manutenção da Qualidade</b>   | - Aplicar ferramentas de qualidade para identificar e rastrear problemas |                  | x                    | x                   |                    | x                    | x               | 66%           |
|                                  | - Planejar ações de correções                                            |                  | x                    |                     |                    | x                    | x               | 50%           |
|                                  | - Simular impactos                                                       |                  |                      |                     |                    |                      |                 |               |
|                                  | - Identificar e implementar melhorias                                    |                  |                      | x                   |                    |                      | x               | 33%           |
|                                  | - Estratégias de acompanhamento de desempenho                            |                  | x                    |                     | x                  | x                    | x               | 66%           |
|                                  | - Identificar métricas                                                   |                  | x                    |                     | x                  | x                    | x               | 66%           |
| <b>Administração</b>             | - Identificar atividades relacionadas                                    |                  | x                    |                     |                    | x                    | x               | 50%           |
|                                  | - Eliminar atividades desnecessárias                                     |                  | x                    |                     |                    | x                    | x               | 50%           |
|                                  | - Clareza nas atividades com os Stakeholders                             |                  |                      |                     |                    |                      | x               | 17%           |
|                                  | - Melhorar a gestão dos objetivos administrativos                        |                  | x                    |                     |                    | x                    | x               | 50%           |
|                                  | - Estimular a participação e aprendizado                                 |                  |                      | x                   |                    |                      | x               | 33%           |
|                                  | - Questionamento contínuo                                                |                  |                      |                     |                    |                      |                 |               |
|                                  | - Ajustar atividades                                                     |                  |                      |                     |                    |                      | x               | 17%           |
| <b>Segurança e Meio Ambiente</b> | - Especificar padrões e procedimentos.                                   | x                | x                    | x                   |                    | x                    | x               | 83%           |
|                                  | - Determinar a correta separação e descarte                              |                  | x                    |                     |                    | x                    | x               | 50%           |
|                                  | - Controlar as condições físicas do ambiente                             |                  | x                    |                     |                    | x                    | x               | 50%           |
|                                  | - Especificar e utilizar dispositivos de proteção.                       | x                | x                    | x                   |                    | x                    | x               | 100%          |

## 4.2 DESCRIÇÃO DA ANÁLISE E APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DO TPM E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A INDÚSTRIA 4.0

Os conceitos de TPM, amplamente utilizados nos equipamentos de produção/fabricação, possuem todas as condições e características para aplicação nos equipamentos e tecnologias digitais da I4.0.

Através da pesquisa inicial da literatura e, posteriormente, na investigação em todos os artigos selecionados da RSL, bem como o complemento de informação proveniente da pesquisa qualitativa, foi possível realizar uma análise e apresentar, de forma estruturada, a aplicação e contribuição dos conceitos do TPM nas tecnologias da I4.0 e suas respectivas contribuições. Essa análise e apresentação foi estratificada e detalhada para cada pilar do TPM.

### 4.2.1 Pilar Melhoria Específica

Com a principal característica de identificação e redução das perdas no processo produtivo (Sahoo et al., 2020), o pilar Melhoria Específica, voltado para as tecnologias digitais da I4.0, sejam elas com componentes físicos (*Hardware*), ou pela transmissão de dados (*software*), pode ser desenvolvido da seguinte forma:

- Apresentar e registrar todas as condições básicas (dados dos fabricantes) dos equipamentos e como monitorar;
- Habilidade de todos os envolvidos na utilização da tecnologia digital identificar possíveis problemas e condições causadoras das falhas ocultas;
- Gerar e utilizar ferramentas de controle com o correto registro das variáveis de operação do equipamento;
- Criar roteiros de inspeções periódicas, com a aplicação dos conhecimentos adquiridos e registros nas ferramentas de controle;
- Trabalhar em grupos multidisciplinares e em períodos regulares, avaliando os equipamentos/componentes, determinados pelo grau de criticidade, e identificando os pontos de correção/ajustes;
- Atualizar e sugerir novos métodos de controle dos equipamentos.

#### 4.2.2 Pilar Manutenção Autônoma

Este pilar proporciona um maior controle e conhecimento do operador sobre as tecnologias digitais, e promove o protagonismo do mesmo. Os operadores são de fundamental importância para o correto uso das tecnologias, e através deste pilar, são geradas rotinas de inspeções e os operadores são capacitados a identificar e realizar pequenas intervenções sem a presença da equipe de manutenção (Tortorella et al., 2022). Este pilar se caracteriza então por:

- Treinar os operadores sobre as condições de operação dos equipamentos e a realizar pequenas intervenções.
- Gerar *Checklist* para registro dos itens inspecionados regularmente, com os parâmetros corretos de aplicação e controle;
- Verificar a limpeza, e possíveis acúmulos de impurezas nos equipamentos/componentes;
- Assegurar que as conexões de ligação ou interligações entre os hardwares estejam de forma correta e sem rompimento.
- Identificação inicial dos problemas, através das inspeções através dos 5 sentidos, primeira e mais simples forma de ensaios de identificação de anormalidade, e identificado acionar a manutenção.
- Incrementando o conhecimento, as habilidades dos operadores para definir o padrão do ambiente e utilização das tecnologias digitais.

#### 4.2.3 Pilar Manutenção Planejada

Com o intuito de gerir todas as atividades de manutenção, eliminando, ou pelo menos reduzindo a execução de manutenção na condição de quebra (corretiva), o pilar manutenção planejada é o que tem maior interface com as recomendações dos fabricantes e com as técnicas de inspeção, atuando como uma ferramenta de avaliação e/ou validação das condições de controle das tecnologias digitais (Samadhiya et al., 2024). Este pilar se caracteriza por:

- Avaliar e identificar as situações atuais dos equipamentos (*hardware*), com o registro dos dados técnicos, históricos de intervenções, testes realizados, entre outros;

- Criar ferramentas de controle para avaliar o desempenho dos equipamentos;
- Determinar a criticidade dos equipamentos e dos componentes, assim como a forma de controle;
- Estabelecer planos e rotinas de inspeções na manutenção dos equipamentos;
- Aplicar técnicas de monitoramento através da Manutenção Preditiva, como a termografia, para verificar os parâmetros operacionais determinado pelo fabricante;
- Suporte para os operadores no Pilar Manutenção Autônoma;
- Intervenções para correções planejadas;
- Avaliar e propor melhorias para atividades de manutenção com a modernização das ferramentas e processos de execução;
- Treinamento contínuo dos colaboradores das áreas de manutenção e ampliação de seus conhecimentos com a utilização de técnicas que visam aumentar a confiabilidade dos equipamentos e transmissão de dados.

#### **4.2.4 Pilar Treinamento e Educação**

Com a finalidade transformadora de aumentar os conhecimentos dos colaboradores envolvidos com as novas tecnologias digitais, este pilar é estruturado para disseminar e transmitir novos conhecimentos das tecnologias digitais, gerar habilidades interpessoais e proporcionar aprendizados alinhados com as diretrizes e metas da empresa (Medyński et al., 2023). Este pilar se caracteriza por:

- Gerar planos de educação e treinamento sobre as novas tecnologias digitais para todos os níveis da empresa;
- Disseminar o conhecimento técnico através de apresentações teóricas e práticas para operadores (usuários) e equipes de manutenção sobre *hardwares*, *softwares* (aplicativos – app) e formas de controles de segurança e transmissão de dados;
- Capacitar operadores para o correto manuseio e monitoramento das tecnologias digitais;

- Treinar as equipes para identificar anomalias que representem possíveis “falhas ocultas”;
- Visualizar e aplicar melhorias nas instalações de *layout* para melhor utilização das tecnologias digitais.
- Realizar reuniões periódicas para discussões sobre os avanços e a modernização das novas tecnologias digitais, bem como a implementação de melhorias.

#### **4.2.5 Pilar Controle Inicial (melhoria de projeto)**

Este pilar, conforme descrito por Tortorella et al. (2021), foi idealizado para aplicar em novos projetos os conhecimentos adquiridos nos outros pilares e em equipamentos já existentes. Esse pilar torna-se importante devido ao rápido desenvolvimento e atualizações das novas tecnologias digitais. O mesmo caracteriza-se por:

- Identificação das melhorias que poderão ser aplicadas em novos projetos;
- Criar grupos com todos os envolvidos, para o desenvolvimento das facilidades de manutenção e controle das tecnologias digitais;
- Identificar os custos diretos e indiretos que envolvem a aquisição (modernização), operação e manutenção (controle das condições e revisões);
- Determinar a interatividade das tecnologias digitais com os processos e os resultados esperados, gerando desta forma uma maior confiabilidade de todo o sistema.

#### **4.2.6 Pilar Manutenção e Qualidade**

Como todas as atividades referentes à Gestão da Qualidade, este pilar visa entender, registrar e manter os históricos (rastreabilidade) das intervenções. Assim, o mesmo contribuiu com o incremento do conhecimento e uma correta identificação da causa raiz dos problemas, na busca da “falha zero” para as novas tecnologias, e do “defeito zero” no produto e ou serviço (Xiang et al., 2021). Este pilar caracteriza-se por:

- Aplicar as ferramentas da qualidade para identificação dos problemas e gerar rastreabilidade;
- Planejar ações de correções de problemas identificados nas tecnologias digitais;
- Simular e verificar impactos das medidas identificadas para mitigar erros e retrabalhos;
- Permitir identificar e implementar melhorias nos sistemas que utilizam as novas tecnologias digitais;
- Consolidar estratégias de acompanhamento de desempenho das tecnologias digitais;
- Identificar métricas para bom desempenho, tanto dos sistemas, equipamentos e componentes.

#### **4.2.7 Pilar Administração (área de apoio)**

Este pilar visa a aplicação de melhorias e a eliminação de desperdícios nas atividades administrativas, assim como demonstra a aplicação e engajamento de todos os setores da empresa na utilização do TPM aplicado nas tecnologias digitais. Atualmente, todas as atividades de uma empresa estão vinculadas às utilizações de equipamentos com transmissão de dados através da internet (Samadhiya et al., 2024). Este pilar caracteriza-se por:

- Identificar as atividades importantes relacionadas às tecnologias digitais de cada área de apoio;
- Eliminar as atividades desnecessárias e até mesmo equipamentos obsoletos.
- Clareza nas atividades que envolvam todos os *Stakeholders*, os indicadores de performance, o processo administrativo e o resultado esperado;
- Melhorar a gestão e o cumprimento dos objetivos administrativos;
- Estimular a participação e aprendizado de todos os envolvidos;
- Questionamento contínuo das relevâncias das atividades e sugestões de melhorias;

- Ajustar as atividades que prejudiquem os outros processos e a aplicação de novas tecnologias digitais.

#### **4.2.8 Pilar Segurança e Meio Ambiente**

Pilar destinado a promover a segurança na aplicação das novas tecnologias digitais, a manutenção de um ambiente seguro, a especificar as regras e parâmetros de descarte dos componentes das tecnologias digitais, a criar procedimentos para eliminar incidentes/acidentes e a estimular o envolvimento de todos os colaboradores com a segurança e o meio ambiente (Xiang et al., 2021). Este pilar caracteriza-se por:

- Especificar padrões e procedimentos para garantir a limpeza nos locais e nas próprias tecnologias digitais;
- Determinar a correta separação e descarte dos componentes e equipamentos danificados, com o devido registro e rastreabilidade até o destinatário final;
- Controlar as condições físicas nos ambientes de operação das tecnologias digitais, assim como determinar os requisitos de segurança para as intervenções necessárias;
- Especificar e utilizar dispositivos de proteção, aplicável para a segurança dos colaboradores.

### **4.3 REPRESENTAÇÃO DA COLABORAÇÃO DO TPM COM AS TECNOLOGIAS DIGITAIS**

Com o estudo das novas tecnologias digitais que estruturam a I4.0, entendendo que as mesmas são compostas de equipamentos físicos (*hardwares*), *softwares* e transmissão de dados, e que produzem resultados, sejam de forma física ou resultados para análise, foi possível representar uma provável aplicação dos pilares da metodologia do TPM e as atividades que suportam a gestão de manutenção para cada tecnologia digital.

A metodologia do TPM e seus conceitos tradicionais com histórico de aplicação nos equipamentos de fabricação mecânica, atendem os requisitos para

aplicação e controle das tecnologias digitais que estruturam a Indústria 4.0, com o auxílio de técnicas preditivas.

A estrutura de cada tecnologia digital, com os componentes que a formam, permitiram identificar a aderência dos pilares do TPM com cada tecnologia digital e, desta forma, representar de forma gráfica esta aderência e aplicabilidade.

Essa representação auxiliou na análise da contribuição do TPM para as tecnologias digitais em termos de desempenho, rastreabilidade, histórico de interferências, desenvolvimento de conhecimento técnico e melhorias que apresentem uma confiabilidade e produtividade das mesmas.

A pesquisa apresenta a seguir *Frameworks* individuais para cada tecnologia digital com a contribuição dos Pilares do TPM. As Figuras 13 a 25 apresentam esses *Frameworks* onde as setas vermelhas indicam a aderência das tecnologias digitais com os pilares do TPM e as setas azuis indicam um possível roteiro de implementação.

Figura 13 – *Framework Additive Manufacturing (3D) & TPM*

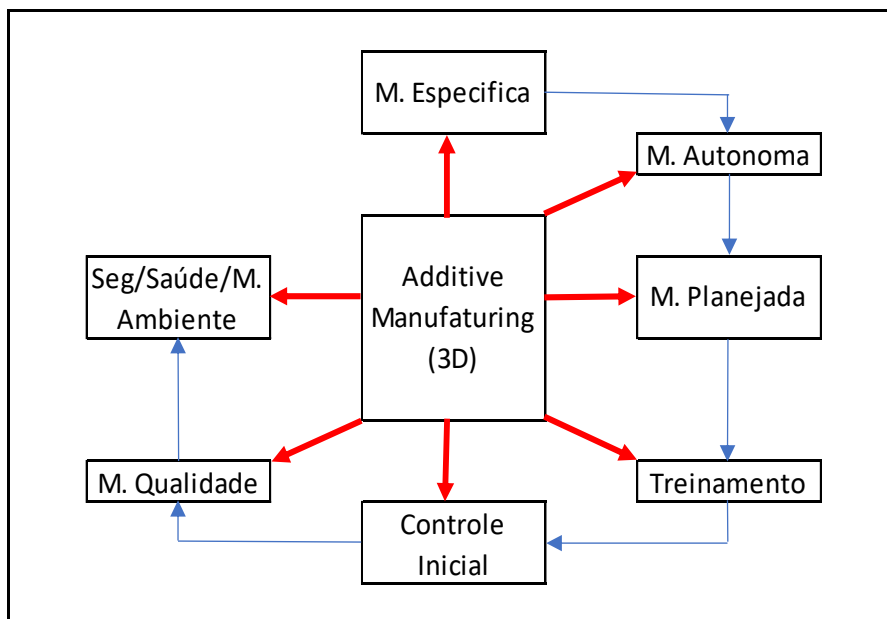


Figura 14 – *Framework Artificial Intelligence (AI) & TPM*

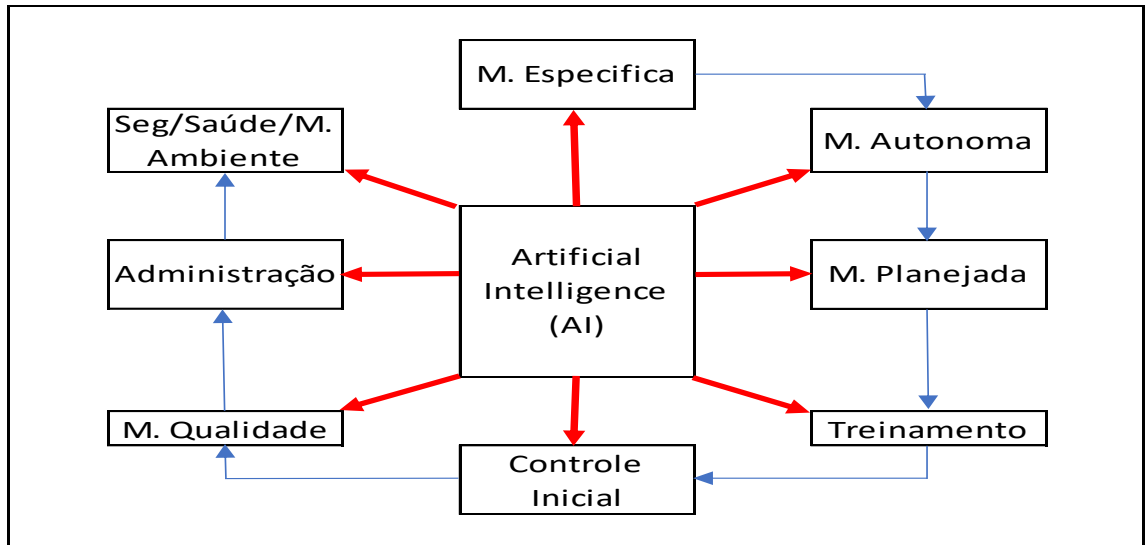


Figura 15 – *Framework Augmented Reality & TPM*

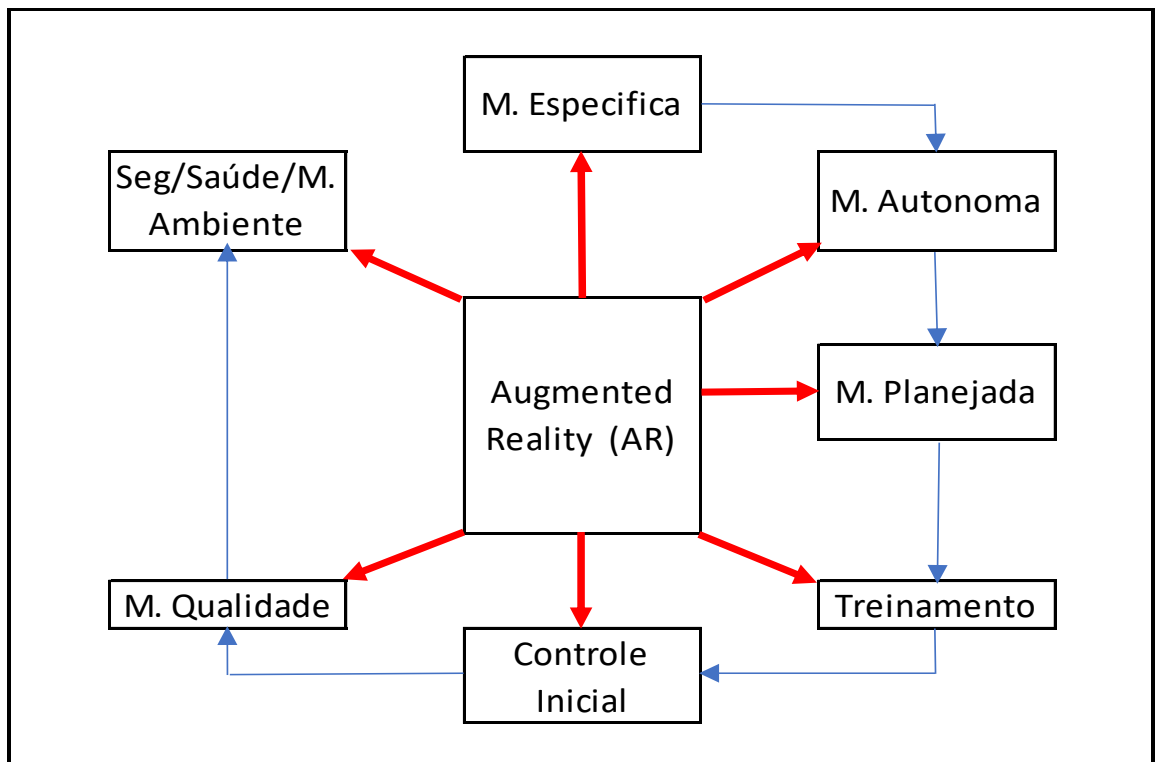


Figura 16 – *Framework Automation and Robots. & TPM*

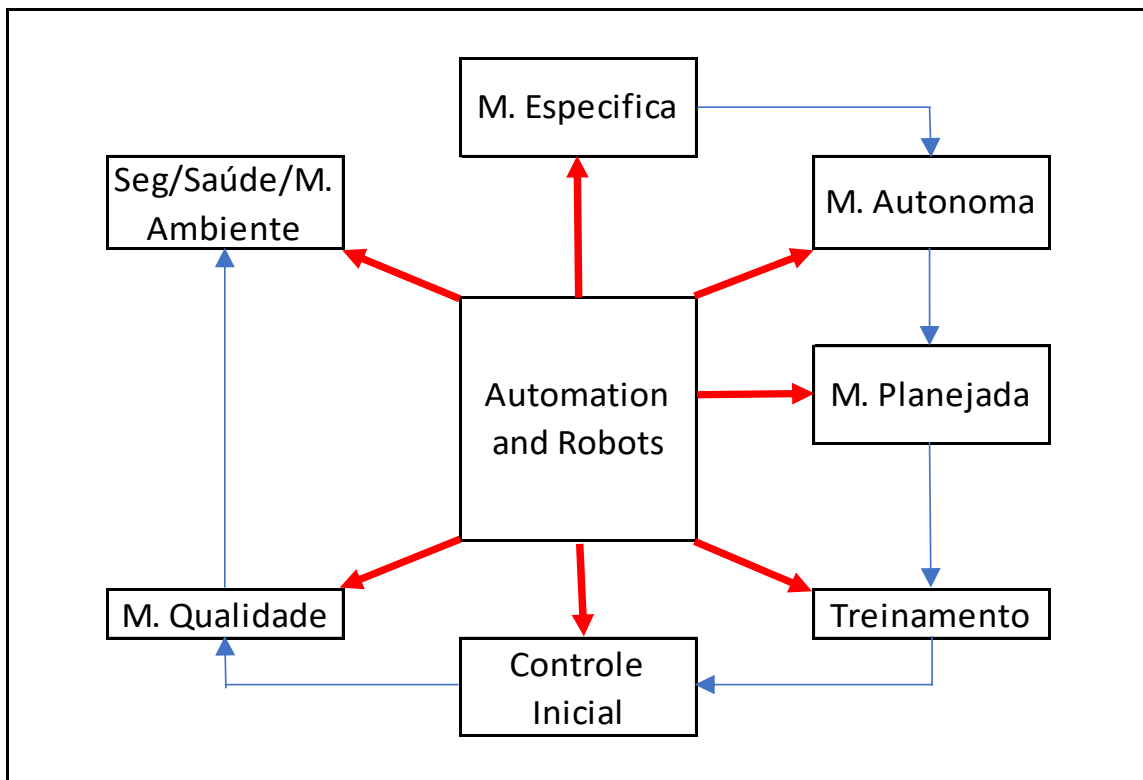


Figura 17 – *Framework Big Data Analysis. & TPM*

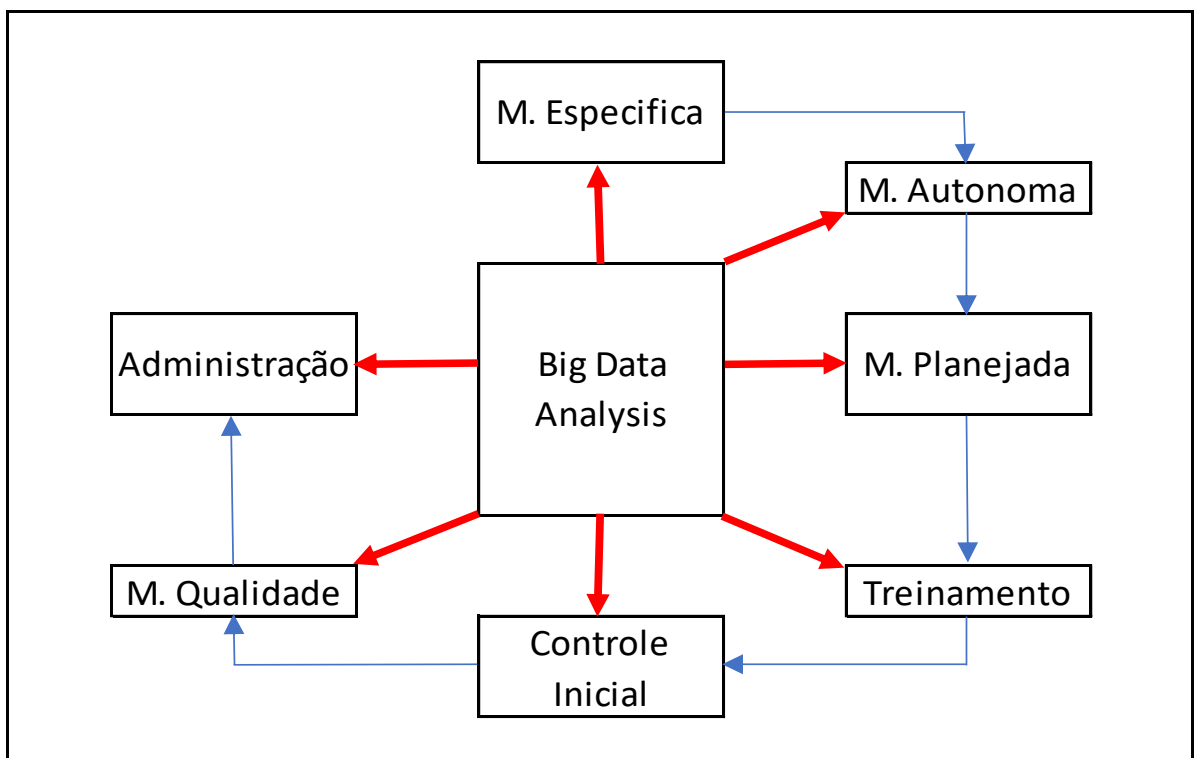


Figura 18 – *Framework Block Chain & TPM*

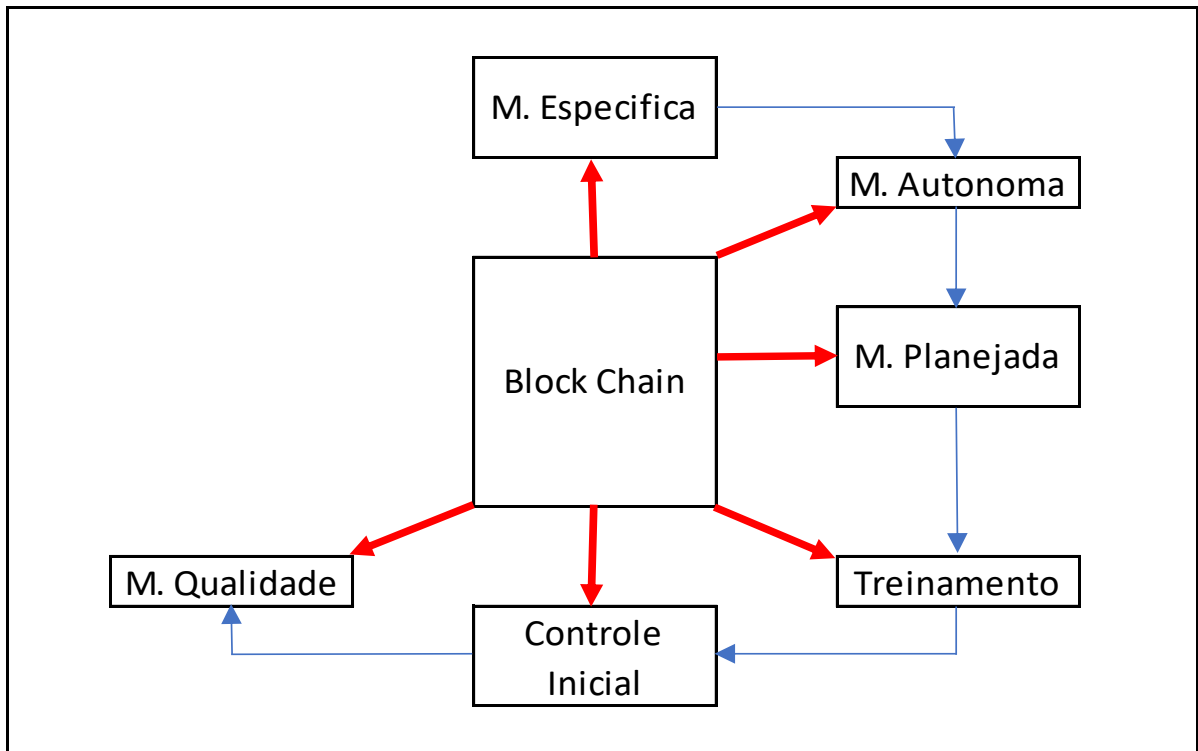


Figura 19 – *Framework Cloud Computing & TPM*

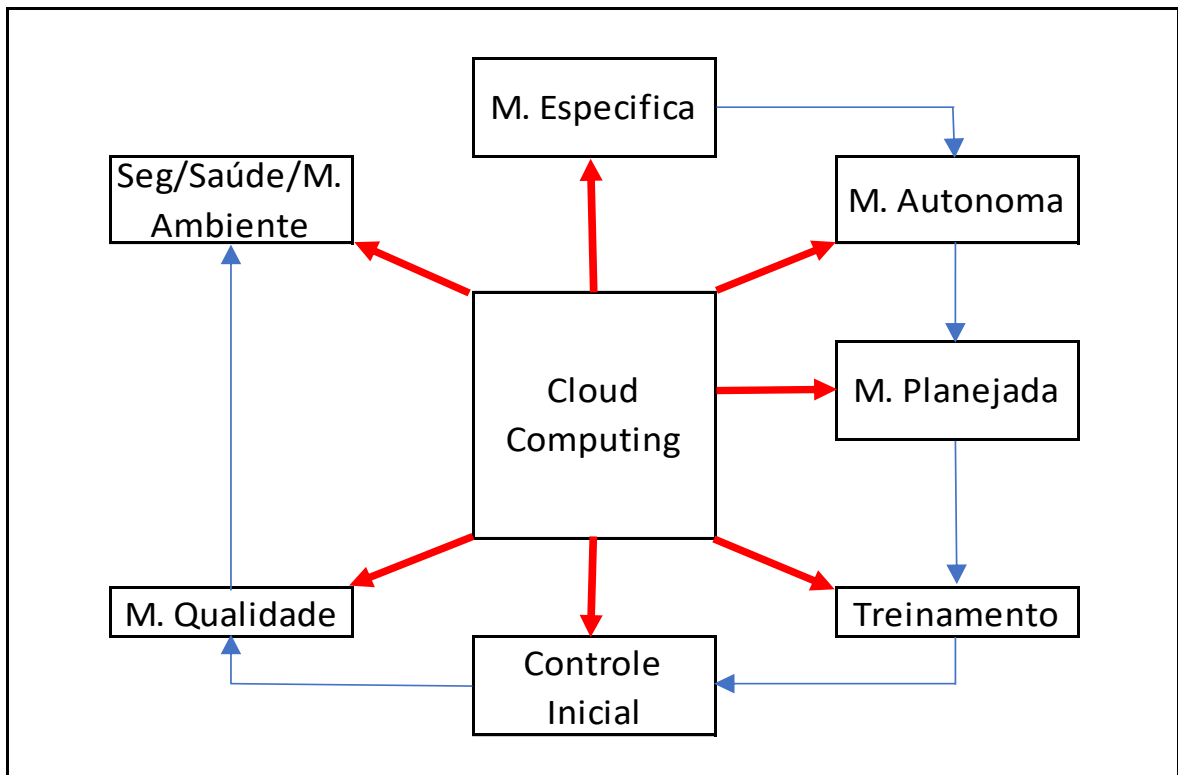


Figura 20 – *Framework Cyber Security System & TPM*

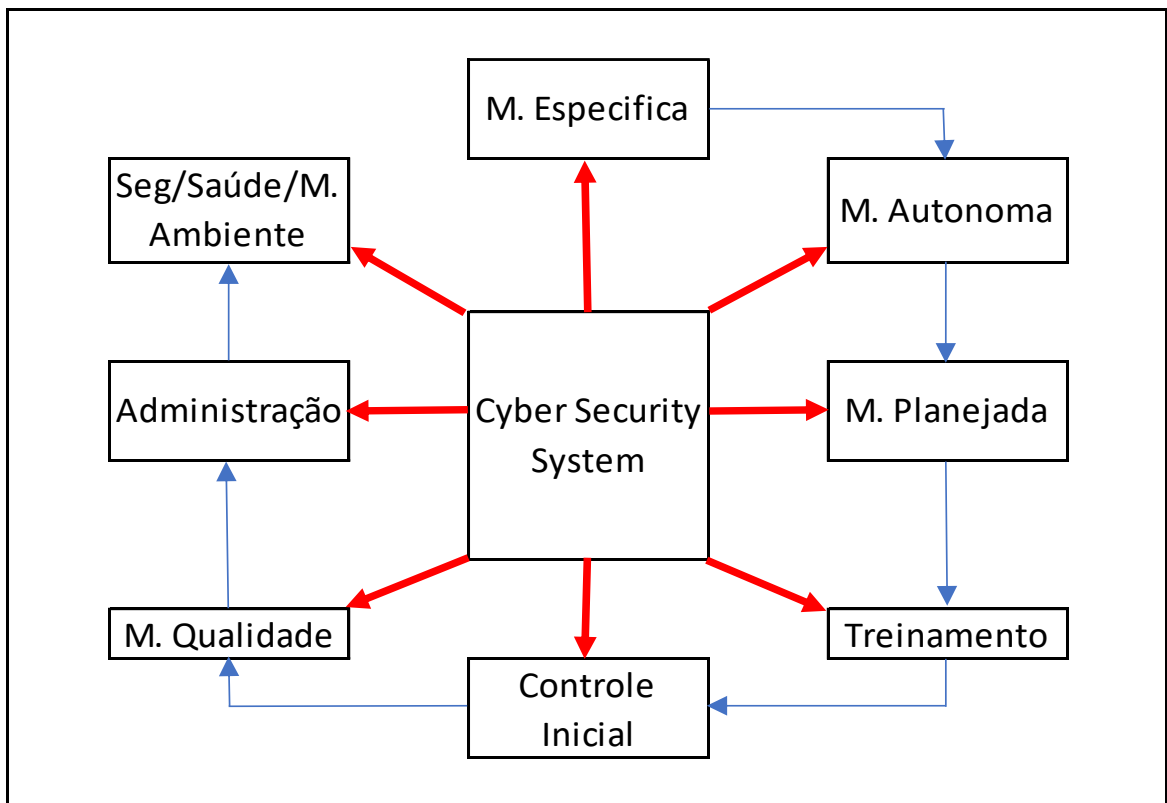


Figura 21 – *Framework Machine Learning (M2M) & TPM*

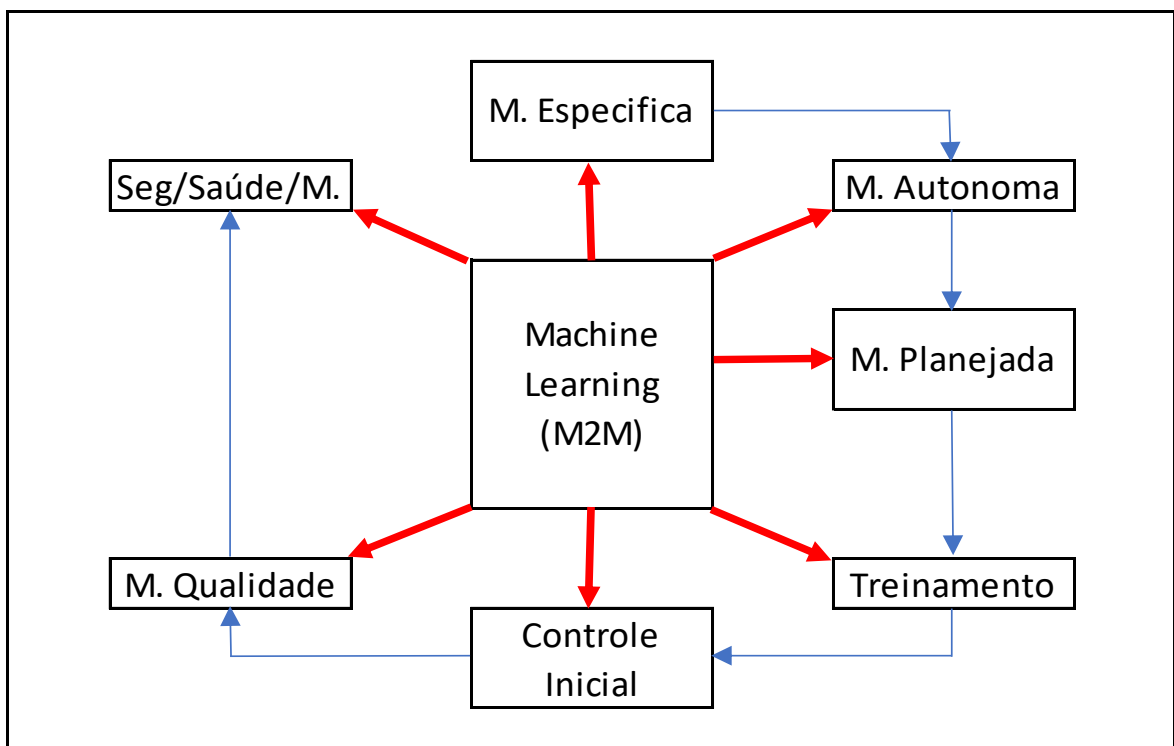


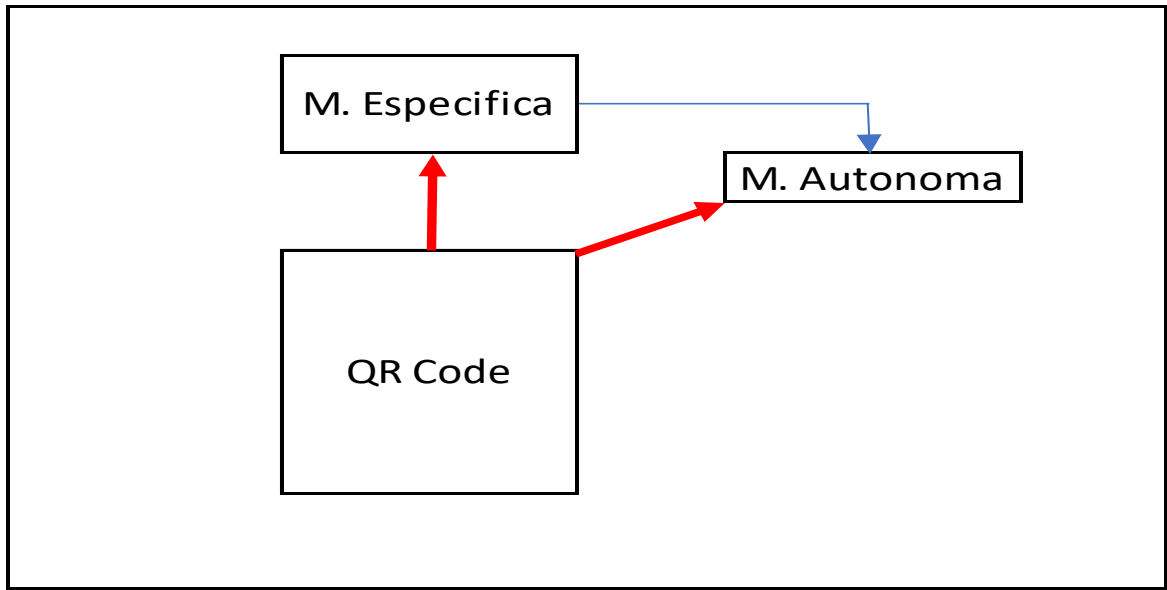
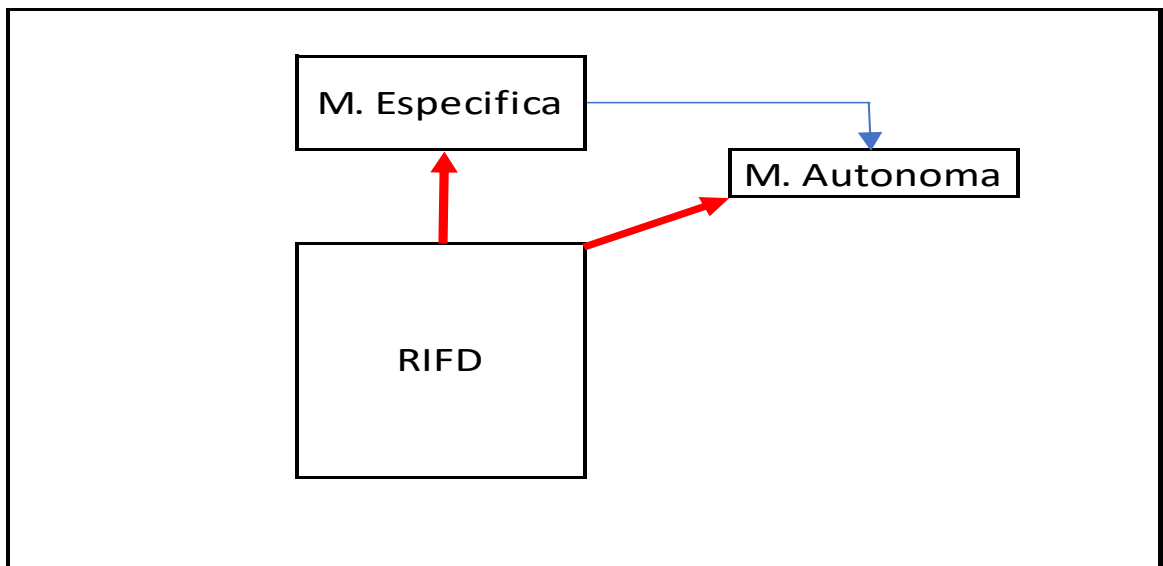
Figura 22 – *Framework QR Code & TPM*Figura 23 – *Framework RIFD & TPM*

Figura 24 – *Framework Simulations and Modeling & TPM*

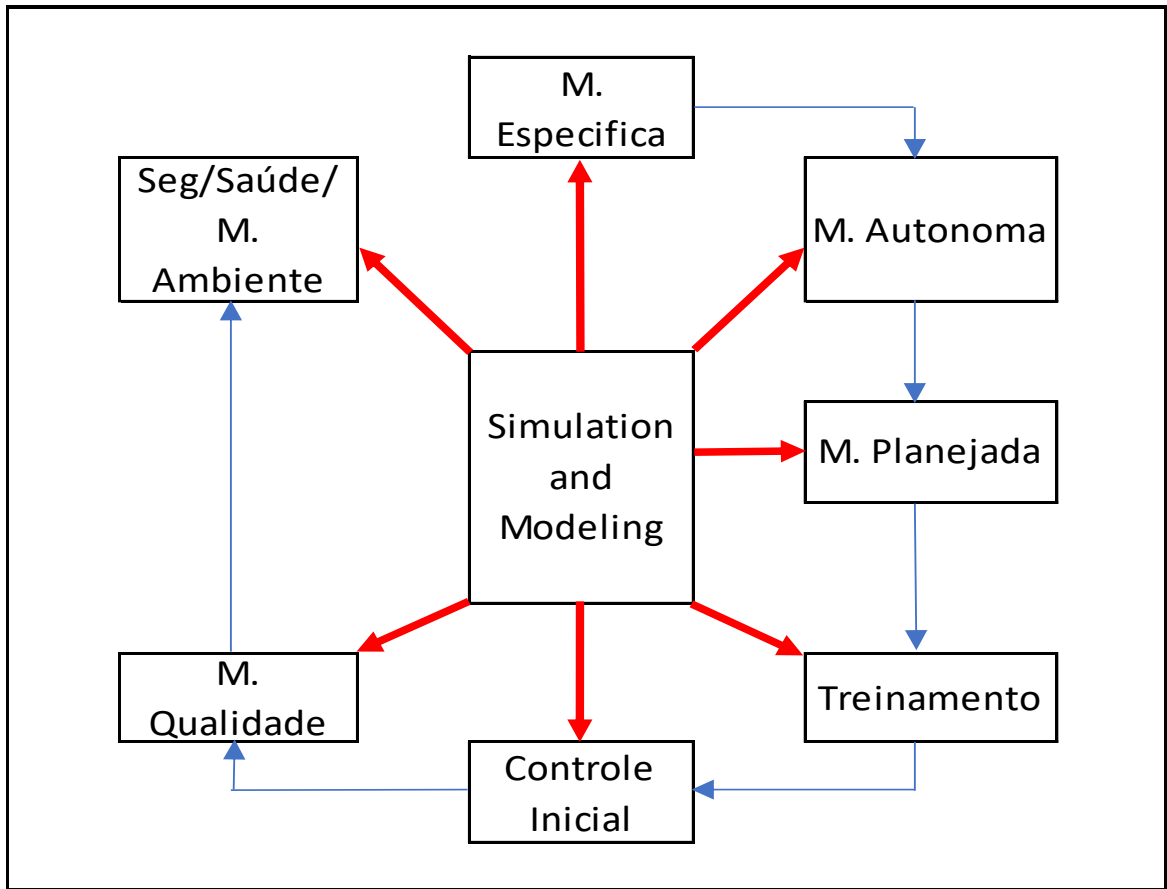
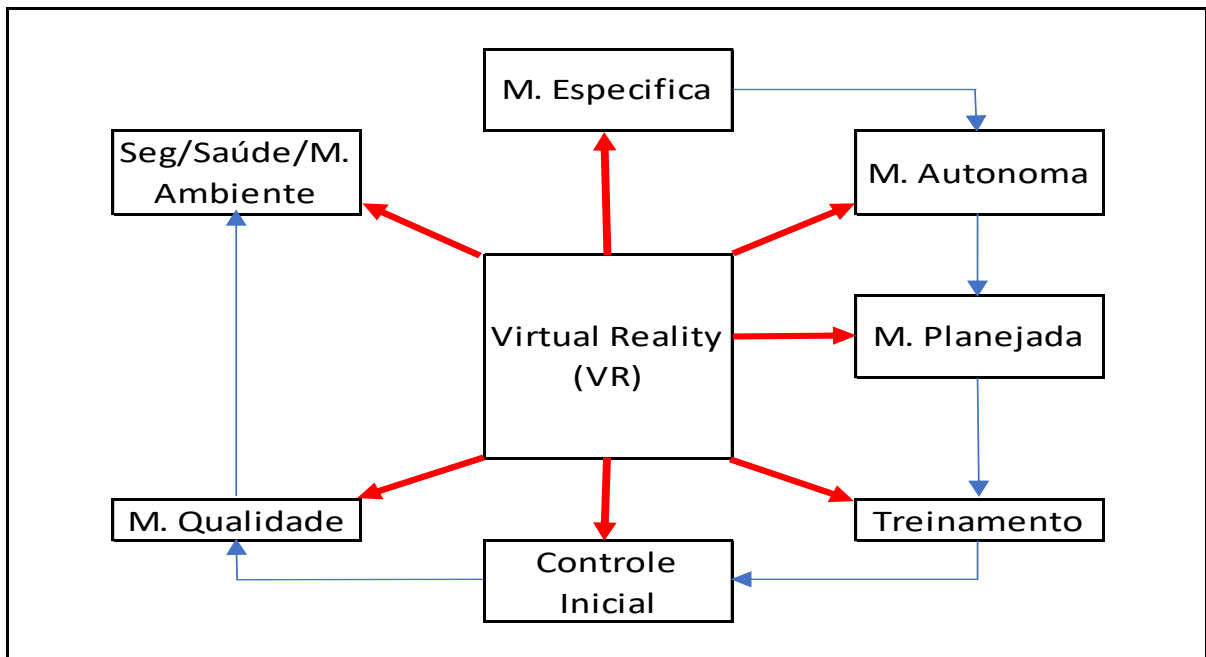


Figura 25 – *Framework Virtual Reality and TPM*

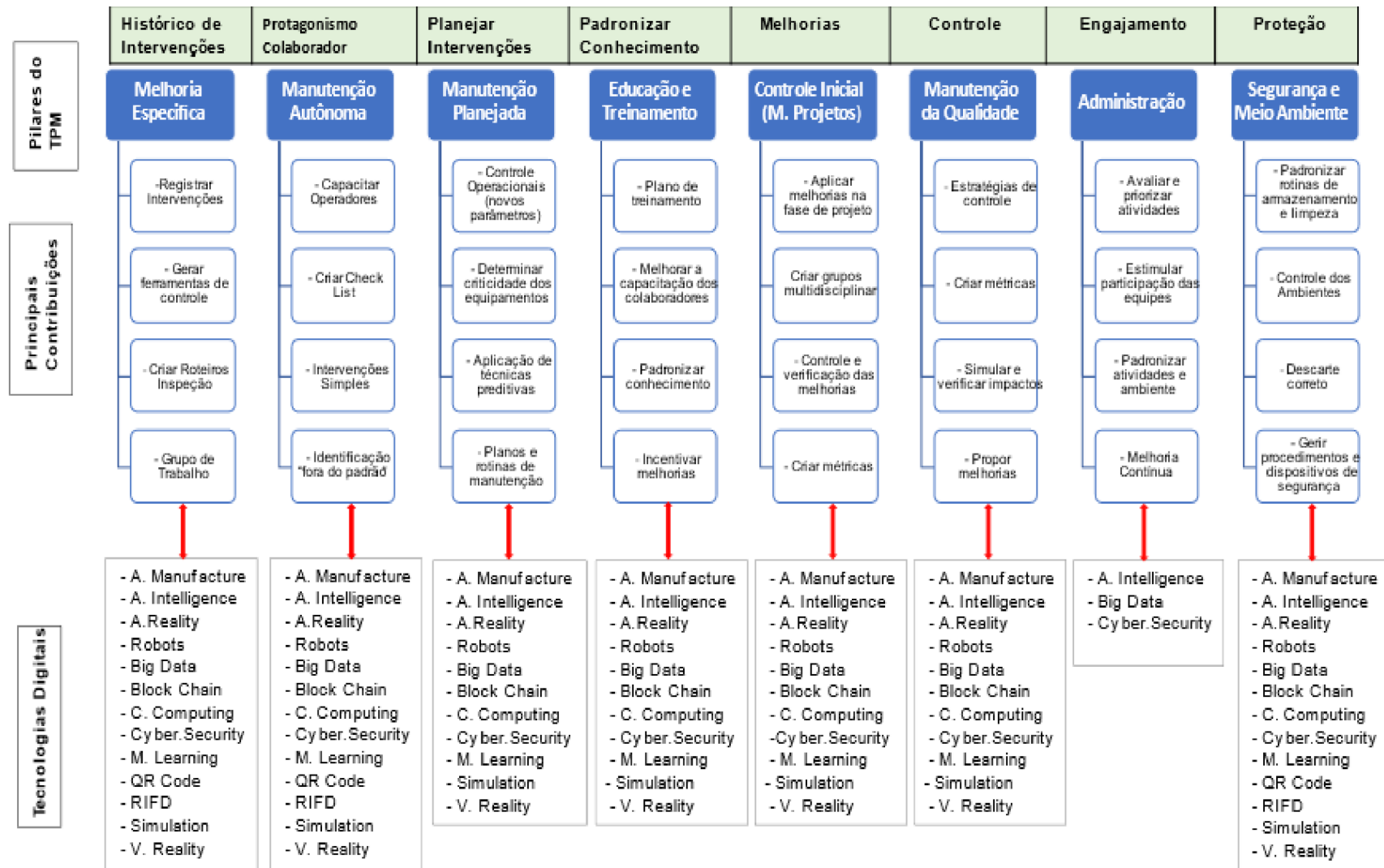


#### 4.4 *FRAMEWORK* DA COLABORAÇÃO DO TPM PARA INDÚSTRIA 4.0

Conforme previsto nos objetivos da presente pesquisa, a seguir é apresentado um *Framework* geral (Figura 26), com as principais contribuições do TPM para as tecnologias digitais, visando garantir a confiabilidade, a eficiência e o desempenho das mesmas.

As contribuições apresentadas no *framework* representam as atividades que podem ser desenvolvidas em cada pilar do TPM e para quais tecnologias digitais são aplicáveis. O desenvolvimento desse *framework* proporciona um maior conhecimento e operacionalidade das tecnologias digitais, proporcionando a busca pela falha zero, o aumento de disponibilidade operacional, o aumento da produtividade por tecnologia, a redução de paradas emergências, economia dos custos diretos e indiretos da manutenção. Assim, o desenvolvimento do TPM auxilia no suporte das tecnologias digitais pode proporcionar uma maior competitividade e sustentabilidade das empresas que utilizam e se enquadram na Indústria 4.0.

Figura 26 - *FRAMEWORK* da Contribuição do TPM para Indústria 4.0



#### 4.5 AVALIAÇÕES DA PESQUISA DE CAMPO SOBRE A GESTÃO DA MANUTENÇÃO E O TPM.

Nesta etapa da pesquisa são apresentados os resultados da pesquisa qualitativa, a qual demonstrou o grau de conhecimento das empresas estudadas em relação as práticas de gestão de manutenção TPM. Seguindo a metodologia descrita no capítulo 3, essa etapa também identificou pontos de melhorias nas atividades de manutenção e na gestão das empresas estudadas.

O quadro da Figura 27 consolida os resultados (respostas dos questionários) da pesquisa qualitativa, mostrando a condição atual em termos de conhecimento e gestão de manutenção para cada empresa participante.

Figura 27 – Respostas ao questionário

| <b>01 - Quais os tipos de gestão de manutenção a empresa utilizam?</b>                                                    |                                                                                                                                                   |                                                                           |                                                   |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--|
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                     | <b>Vetorial</b>                                                                                                                                   | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                | <b>LUBRAC</b>                                     |  |
| (X) Corretiva.                                                                                                            | (X) Corretiva.                                                                                                                                    | (X) Corretiva.                                                            | (X) Corretiva.                                    |  |
| ( ) Preventiva.                                                                                                           | ( ) Preventiva.                                                                                                                                   | (X) Preventiva.                                                           | (X) Preventiva.                                   |  |
| ( ) Preditiva.                                                                                                            | (X) Preditiva.                                                                                                                                    | (X) Preditiva.                                                            | ( ) Preditiva.                                    |  |
| <b>02 - Quais são os indicadores utilizados para mensurar desempenho dos equipamentos? Demonstam melhora, sim ou não?</b> |                                                                                                                                                   |                                                                           |                                                   |  |
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                     | <b>Vetorial</b>                                                                                                                                   | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                | <b>LUBRAC</b>                                     |  |
| Indicadores fornecidos pelos fabricantes; Ex.: Consumo de energia, Temp. Interno, velocidade                              | Através das informações dos manuais dos fabricantes, através da observação das medições medianas dentro dos parâmetros indicados pelo fabricante. | <i>Back log</i> de manutenção; CMF - custo médio de manutenção; PMP; OEE. | Testes com máquinas para garantir seu desempenho. |  |
| <b>3 - Conhece ou já ouviu falar do TPM - Manutenção Produtiva Total e seus pilares?</b>                                  |                                                                                                                                                   |                                                                           |                                                   |  |
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                     | <b>Vetorial</b>                                                                                                                                   | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                | <b>LUBRAC</b>                                     |  |

|                                                                                                                      |                                                                                                             |                                                                                                    |                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Sim e citou os pilares de manutenção autônoma e planejada.                                                           | Já ouviu falar, como manutenção focada em melhorias, mas ainda não aplicam.                                 | Sim.                                                                                               | Não conheço.                                                                       |
| <b>04 – O que é manutenção Planejada?</b>                                                                            |                                                                                                             |                                                                                                    |                                                                                    |
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                | <b>Vetorial</b>                                                                                             | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                                         | <b>LUBRAC</b>                                                                      |
| Definir momentos estratégicos para pausar o hardware para uma manutenção, gerando o menor impacto negativo possível. | Já ouviu falar, como manutenção focada em melhorias, mas ainda não aplicam.                                 | Sim.                                                                                               | Não conheço.                                                                       |
| <b>05 – O que é manutenção autônoma?</b>                                                                             |                                                                                                             |                                                                                                    |                                                                                    |
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                | <b>Vetorial</b>                                                                                             | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                                         | <b>LUBRAC</b>                                                                      |
| Manutenções básicas que o próprio operador pode fazer.                                                               | Manutenção autônoma é focada na melhoria do conhecimento.                                                   | Estratégia de manutenção, na qual o operador é responsável pela manutenção do próprio equipamento. | Capacitar a mão de obra operária para o emprego de simples técnicas de manutenção. |
| <b>06 - Conhece ou já ouviu falar da Indústria 4.0 ou 4ª Revolução Industrial?</b>                                   |                                                                                                             |                                                                                                    |                                                                                    |
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                | <b>Vetorial</b>                                                                                             | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                                         | <b>LUBRAC</b>                                                                      |
| Sim, conheço                                                                                                         | Já ouvi falar. Uso da informática para automatizar, reduzir tempo, custo na produção e execução de tarefas. | Sim                                                                                                | Sim                                                                                |
| <b>07 – Quais tecnológicas digitais utilizadas na Indústria 4.0 conhece?</b>                                         |                                                                                                             |                                                                                                    |                                                                                    |
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                | <b>Vetorial</b>                                                                                             | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                                         | <b>LUBRAC</b>                                                                      |
| Tecnologias visíveis, grande volume de dados, inteligência artificial.                                               | Programação, sistema para automação.                                                                        | IoT, <i>Cloud e Big Data Analysis</i> .                                                            | <i>Cloud e IoT.</i>                                                                |

| <b>08 – Existe manutenção nas tecnologias digitais utilizadas? Que tipo (vide questão 01)?</b>                                  |                                                                                                                        |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                           | <b>Vetorial</b>                                                                                                        | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                                                            | <b>LUBRAC</b>                                                                                                                                                                                                                         |
| Sim, limpeza do hardware.                                                                                                       | Sim, corretivas e evolutivas                                                                                           | Corretiva, Preventiva e Preditiva.                                                                                    | Corretiva e Preventiva                                                                                                                                                                                                                |
| <b>09 – Como é identificado o bom funcionamento/resultado das tecnológicas digitais utilizadas?</b>                             |                                                                                                                        |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                           | <b>Vetorial</b>                                                                                                        | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                                                            | <b>LUBRAC</b>                                                                                                                                                                                                                         |
| Além do citado na resposta 2, através da capacidade maior de processamento.                                                     | Com base em monitoramento de parâmetros e indicadores e de produção.                                                   | Por meio da eficácia e da redução do tempo efetivo necessário para executar as tarefas.                               | Se facilita a vida do usuário.                                                                                                                                                                                                        |
| <b>10 – Através da gestão da manutenção, pode-se melhorar a eficácia das tecnologias digitais (I4.0) utilizadas na empresa?</b> |                                                                                                                        |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Gulmi Soluções</b>                                                                                                           | <b>Vetorial</b>                                                                                                        | <b>Gold Eletromecânica</b>                                                                                            | <b>LUBRAC</b>                                                                                                                                                                                                                         |
| Sim, inclusive garantindo um SLA - <i>Service Level Agreement</i> , dentro do combinado com o cliente.                          | Entendo que a gestão de indicadores é possível reduzir e aprimorar o processo evolutivo da automatização da indústria. | Sim, a gestão eficiente das tecnologias digitais tem um impacto significativo na eficácia da manutenção nas empresas. | A gestão da manutenção pode melhorar a eficácia das tecnologias da I4.0 ao utilizar dados em tempo real para intervenções proativas e otimizar recursos através de estratégias de manutenção baseada nas condições reais de operação. |

Além das perguntas mostradas na Figura 24, houve questionamentos complementares realizados na ocasião das entrevistas presenciais ou virtuais.

Esses questionamentos foram transcritos de forma sucinta como continuação do roteiro original.

A questão 11 questionou se existem, além dos controles operacionais identificados, controles/registros da gestão de manutenção? Resposta: Todos os participantes informaram que não possuem a rotina de, a cada intervenção realizada nos equipamentos, registrar as ações realizadas para gerar um histórico de manutenção. Automaticamente, não possuem os registros nem a identificação das causas das falhas. Foi comentado por todos os participantes que as ações de correção e as identificações das prováveis causas são baseadas no conhecimento tácito dos técnicos.

A questão 12 questionou se as ações de manutenção são realizadas por times próprios de manutenção e se tem a rastreabilidade destas intervenções? Resposta: Todos os entrevistados responderam que as ações de manutenção são realizadas pelo operador e, em alguns casos para equipamentos específicos, os próprios fabricantes ou proprietários dos equipamentos encaminham uma equipe especializada para realizar avaliações e as intervenções necessárias, pois alguns equipamentos são de propriedades de terceiros e ficam sob a responsabilidade e “hospedagem” da empresa para distribuição de dados. As empresas não possuem a rotina de registrar através de relatórios técnicos e de manter este histórico a disposição e para o melhor entendimento das falhas.

A questão 13 questionou se, mesmo seguindo as condições operacionais, foram gerados planos de manutenção e determinados ciclos para aplicação? Resposta: Não para as 4 empresas consultadas. O monitoramento é realizado em tempo real, mas sem uma rotina de um *checklist* e posterior registro. Não existem determinados períodos para uma avaliação mais detalhada e para a realização das possíveis ações de correção.

A questão 14 questionou se as causas das falhas foram identificadas, registradas e melhorias foram sugeridas/implementadas para que não ocorra mais? Resposta: Não para as 4 empresas consultadas. Normalmente as falhas são corrigidas de imediato, conforme comentários anteriores, não são registradas e não são propostas formas de controle para que a falha não ocorra novamente.

A questão 15 questionou se as empresas trabalham com indicadores de manutenção por equipamento e seus registros? Resposta: Não para as 4 empresas consultadas.

#### 4.6 AVALIAÇÃO DAS PERCEPÇÕES DOS ENTREVISTADOS SOBRE O TPM

Na pesquisa qualitativa, também foi pesquisado sobre a percepção dos entrevistados referente à aplicação da metodologia do TPM ou qualquer outra forma de gestão de manutenção para os equipamentos na rotina de trabalho. Os comentários dos entrevistados foram compilados de uma forma resumida, que pudessem ser agrupados e que gerassem um melhor entendimento do pesquisador.

A Figura 28 apresenta as percepções dos entrevistados sobre a aplicação da metodologia do TPM ou qualquer outra forma de gestão de manutenção para os equipamentos na rotina de trabalho. O preenchimento das “células” representa que os referidos tópicos foram debatidos durante as entrevistas.

Figura 28 - Percepção sobre a Metodologia do TPM para I4.0

| <b>Percepção sobre a Metodologia do TPM para I4.0</b> |       |          |      |        |
|-------------------------------------------------------|-------|----------|------|--------|
|                                                       | Gulmi | Vetorial | Gold | LUBRAC |
| Melhor organização das atividades.                    | X     | X        | X    | X      |
| Rastreabilidade                                       | X     | X        | X    | X      |
| Vantagens operacionais                                | X     | X        | X    | X      |
| Vantagens financeiras                                 | X     | X        | X    | X      |
| Enriquecimento técnico.                               | X     | X        | X    | X      |

#### 4.7 AVALIAÇÃO DO QUESTIONÁRIO APLICADO

De forma a representar com métrica as respostas dos participantes, nesta etapa foi gerado uma compilação das respostas (Tabela 04), com os resultados em porcentagens, considerando a amostragem da pesquisa.

Tabela 4 – Métrica do resultado do questionário

|                                                                           | Resultado do questionário |          |      |        | Comentário                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------|------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                           | Gulmi                     | Vetorial | Gold | LUBRAC |                                                                                                                                          |
| Conhecimento dos tipos de gestão de manutenção                            | X                         | X        | X    | X      | <b>100%</b> conhecem a manutenção corretiva.<br><b>50%</b> conhecem a manutenção Planejada<br><b>50%</b> conhecem a manutenção Preditica |
| Indicadores para mensurar desempenho                                      | X                         | X        | X    | X      | <b>100%</b> pelos software.                                                                                                              |
| Conhecem a Metodologia do TPM para manutenção                             | X                         | X        | X    |        | <b>75%</b> conhecem, mas não totalmente e não aplicam                                                                                    |
| Conhecem Manutenção Planejada                                             | X                         | X        | X    |        | <b>25%</b> conhecem,<br><b>50%</b> ouviram falar e demonstram ter noção<br><b>25%</b> não conhece.                                       |
| Conhecem Manutenção Autônoma                                              | X                         | X        | X    | X      | <b>100%</b> demonstram ter conhecimento.                                                                                                 |
| Conhecem a I4.0                                                           | X                         | X        | X    | X      | <b>100%</b> demonstram ter conhecimento.                                                                                                 |
| Conhecem as Tecnologias Digitais da I4.0                                  | X                         | X        | X    | X      | <b>100%</b> tem conhecimento, mas ficam muito focadas nas que aplicam.                                                                   |
| Existe manutenção nas tecnologias Digitais                                | X                         | X        | X    | X      | <b>100%</b> utilizam a manutenção corretiva e consideram o monitoramento como preventiva.                                                |
| Identificação do bom desempenho das Tecnologias Digitais                  | X                         | X        | X    | X      | <b>100%</b> por monitoramento de dados, sem utilizar indicadores tradicionais da manutenção.                                             |
| A gestão da Manutenção pode melhorar a eficácia das tecnologias digitais? | X                         | X        | X    | X      | <b>100%</b> entende que é viável e pode melhorar o desempenho e controle das tecnologias digitais                                        |

De forma a apresentar as ações de manutenção que são realizadas pelas empresas que participaram da pesquisa, foram agrupadas e descritas estas atividades no Bloco Aplicação das respostas do questionário (Tabela 05).

Tabela 5 – Atividades de Manutenção Aplicadas pelas Empresas.

| Blocos de Avaliação | Atividades de Manutenção Realizadas pelas Empresas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | Gulmi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Vetorial                                                                                                                                                                                                             | Gold                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | LUBRAC                                                                                                                                                                                                                         |
| Bloco Aplicação     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Man. Corretiva de limpeza e manutenção dos Hardware.</li> <li>- Monitoramento dos controles operacionais como preventiva.</li> <li>- Correções de falhas através de M. Corretiva de Imediato.</li> <li>- Atividades realizadas pelos Operadores e para alguns equipamentos por equipes especializadas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Atividades de Manutenção Corretivas.</li> <li>- Controle dos Parâmetros de operação dos equipamentos.</li> <li>- Operadores são responsáveis pelas intervenções.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Atividades de :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corretiva;</li> <li>- Preventiva;</li> <li>- Preditiva.</li> </ul> </li> <li>- Controle dos parâmetros operacionais.</li> <li>- Atividades realizadas por equipes especializadas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Atividades de Manutenção :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corretivas;</li> <li>- Preventivas.</li> </ul> </li> <li>- Equipe própria de manutenção.</li> </ul> |

#### 4.8 – REAVALIAÇÃO DO FRAMEWORK VS PESQUISA DE CAMPO.

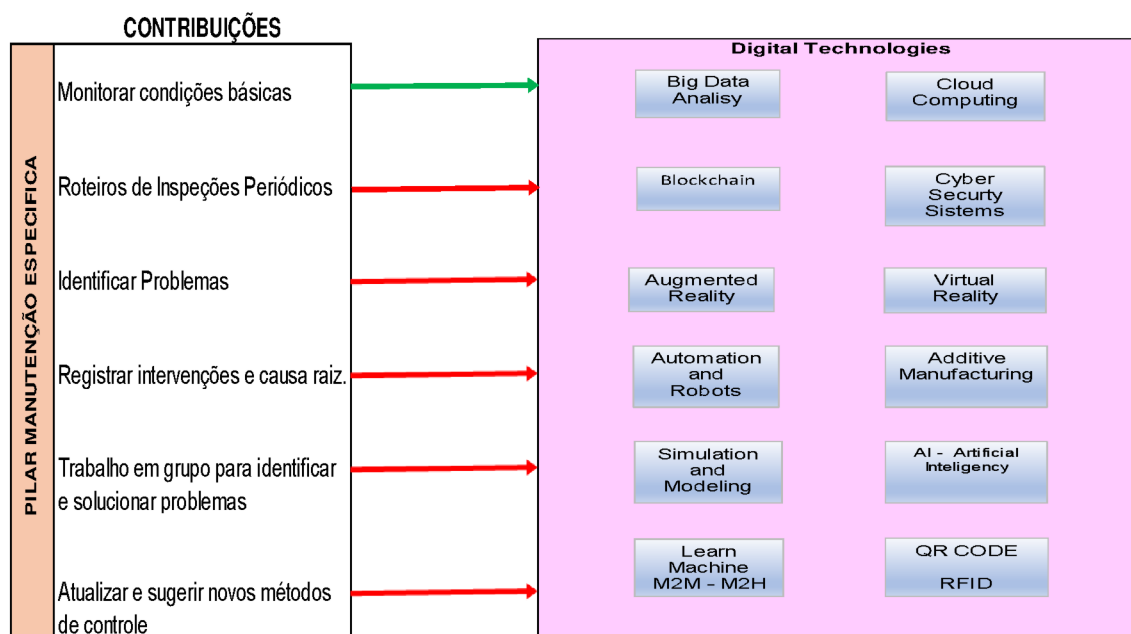
Após a RSL e a pesquisa de campo com a identificação das atividades realizadas pelas empresas para manutenção das tecnologias digitais, através de uma reavaliação das atividades da manutenção produtiva total descritas no item 4.2 e subitens e no Framework (figura 26), com as atividades descritas no Bloco Aplicação representada pela Tabela 03, podemos identificar as contribuições da manutenção produtiva total que são realizadas pelas empresas (representadas por uma seta verde), assim como as contribuições teóricas identificadas que suportariam a manutenção produtiva total na fabricação mecânica da indústria 4.0 (representadas pelas setas vermelhas).

##### 4.8.1 Pilar Melhoria Específica

Através da pesquisa de campo, identificou-se que existe um monitoramento dos parâmetros operacionais e a imediata correção das falhas, através de manutenção corretiva, porém sem registros, identificação da causa raiz e outras ações que poderiam contribuir e suportar o melhor desempenho e entendimento das tecnologias digitais.

Estas ações aplicadas nas correções das falhas, melhorariam o desempenho dos equipamentos e consequentemente a competitividade da empresa.

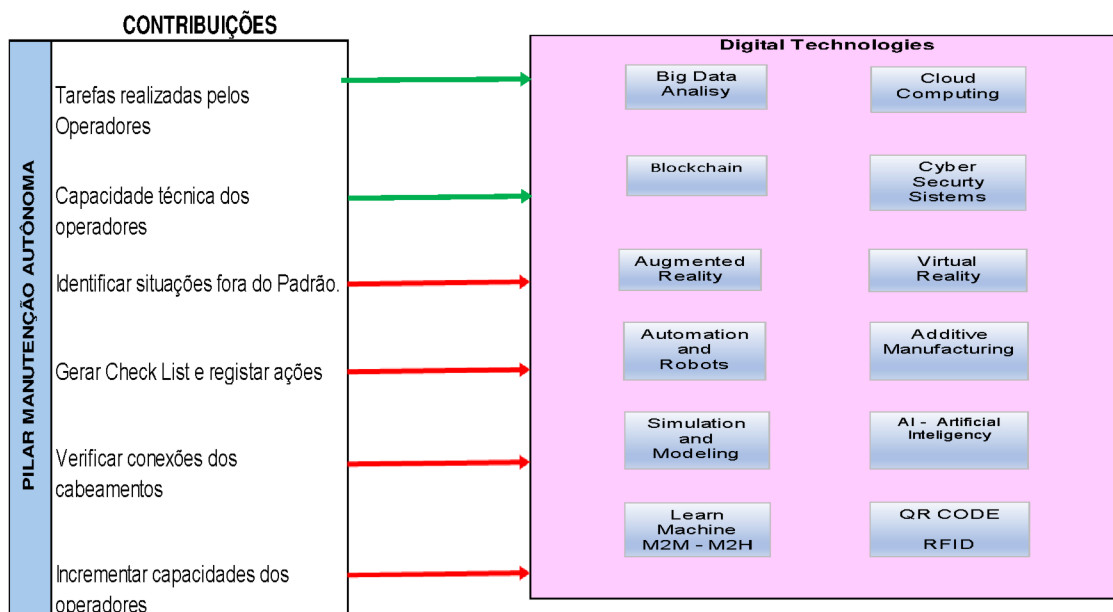
Figura 29 – Contribuições do Pilar Manutenção Específica



#### 4.8.2 Pilar Manutenção Autônoma.

Para o pilar de Manutenção Autônoma, foi possível identificar que os operadores possuem capacidade técnica para realizar as intervenções de manutenção e as tarefas mais simples (como previsto na Manutenção Produtiva Total); mas a pesquisa identificou outras atividades que poderiam contribuir com a melhor utilização e desempenho das tecnologias digitais. Incrementando o conhecimento dos operadores e diminuindo as paradas por falhas das tecnologias digitais que suportam a fabricação mecânica.

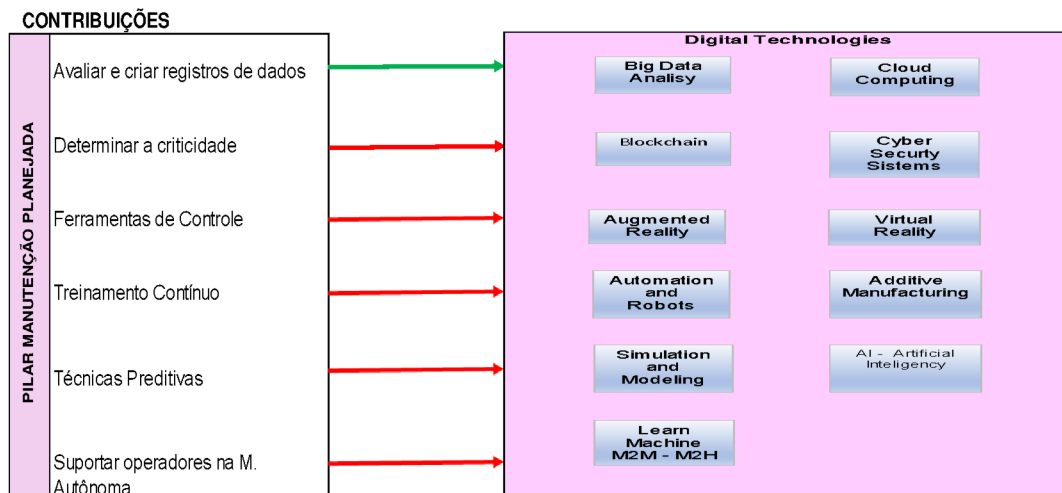
Figura 30 – Contribuições do Pilar Manutenção Autônoma



#### 4.8.3 Pilar Manutenção Planejada.

No Pilar Manutenção Planejada, a pesquisa identificou que existe um monitoramento de dados conforme as informações dos fabricantes, porém, as empresas consultadas não registram este acompanhamento e não registram o seu histórico de intervenções. Desta forma o registro e as atividades demonstradas abaixo suportariam o melhor desempenho e confiabilidade das tecnologias digitais na fabricação mecânica.

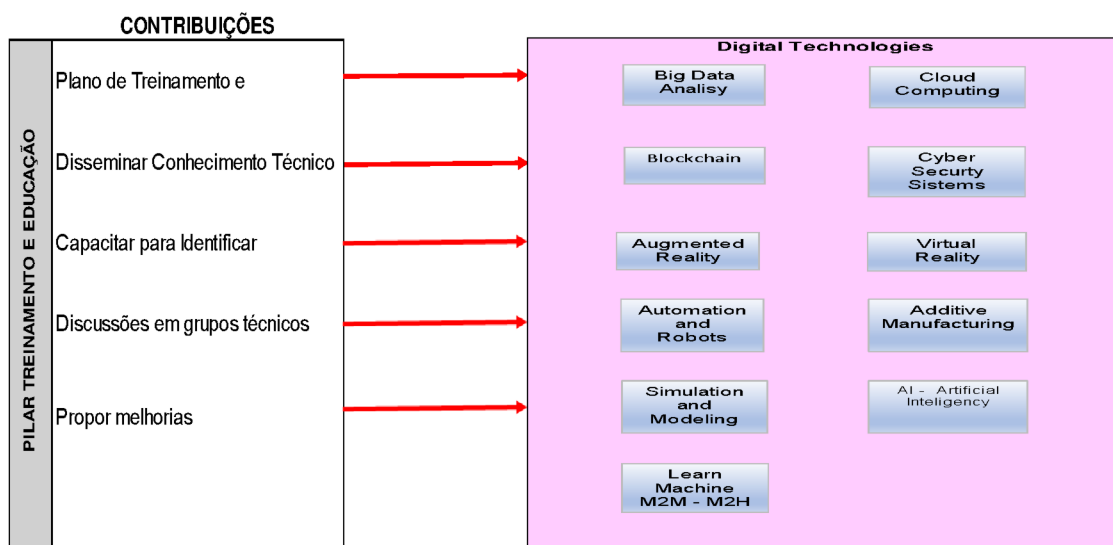
Figura 31 – Contribuições do Pilar Manutenção Planejada



#### 4.8.4 Pilar Treinamento e Educação.

As empresas que participaram da pesquisa não especificaram e não relataram nenhum programa de treinamento e aprimoramento técnico. Desta forma uma estruturação do Pilar Treinamento e Educação, com as atividades descritas, poderá contribuir com a crescimento profissional e ao mesmo tempo o melhor desempenho dos equipamentos, tecnologias digitais presentes na fabricação mecânica nas empresas.

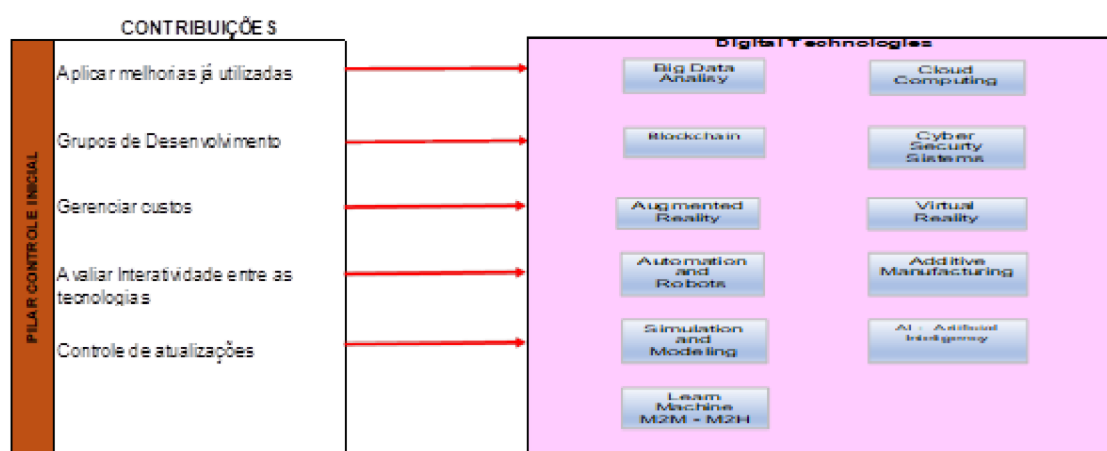
Figura 32 – Contribuições do Pilar Treinamento e Educação



#### 4.8.5 Pilar Controle Inicial (Melhoria de Projeto).

As empresas que participaram da pesquisa, tendo em vista que não utilizam as ações do Pilar Manutenção Específica, consequentemente não aplicam o controle inicial em novos projetos. A seguir são apresentadas as atividades relacionadas ao Pilar Controle Inicial (melhoria de projetos); que suportariam as soluções anteriormente utilizadas em novos projetos. Melhorando o desempenho e confiabilidade das tecnologias digitais.

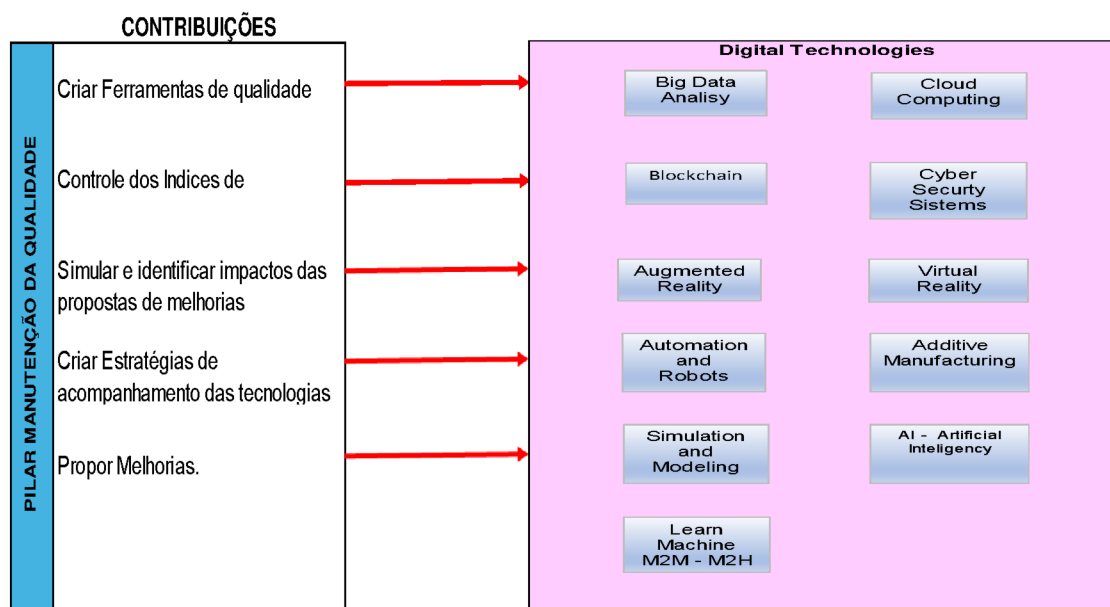
Figura 33 – Contribuições do Pilar Controle Inicial



#### 4.8.6 Pilar Manutenção da Qualidade

A Gestão da Qualidade, para registrar e manter os históricos (rastreabilidade) das intervenções é importante para o melhor entendimento do desempenho das tecnologias digitais. A pesquisa demonstrou que não são gerenciados os indices de manutenção, e através deste são relacionadas algumas das possíveis contribuições teóricas para suportar as tecnologias digitais no processo de fabricação, para manter a qualidade do funcionamento dos equipamentos.

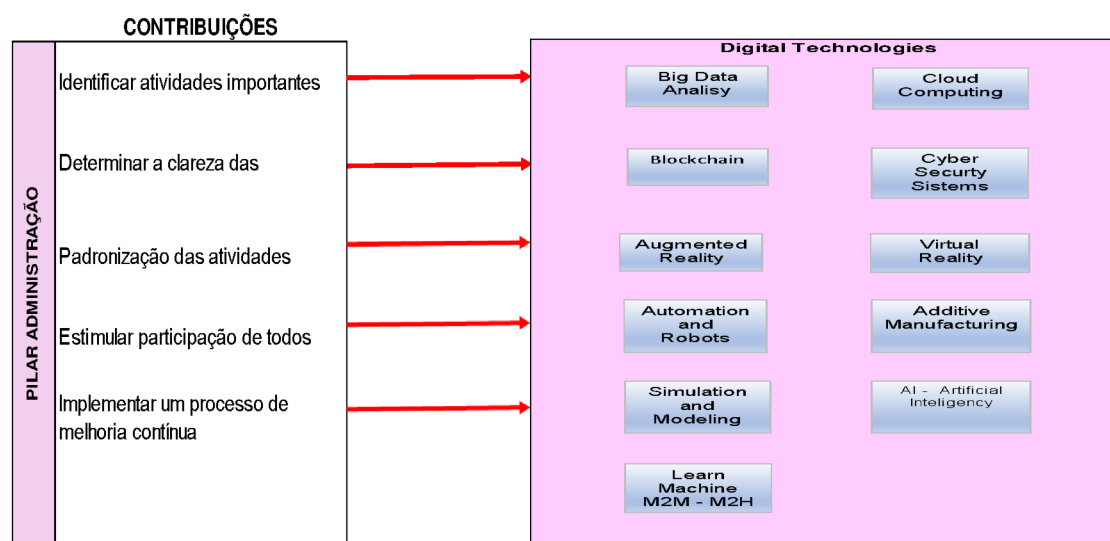
Figura 34 – Contribuições do Pilar Manutenção da Qualidade



#### 4.8.7 Pilar Administração (Área de Apoio).

As atividades abaixo descritas, visam eliminar as atividades desnecessárias e promover o engajamento de todos os departamentos da empresa na utilização do TPM aplicado nas tecnologias digitas, a pesquisa apresenta as atividades abaixo para suportar a fabricação mecânica na indústria 4.0.

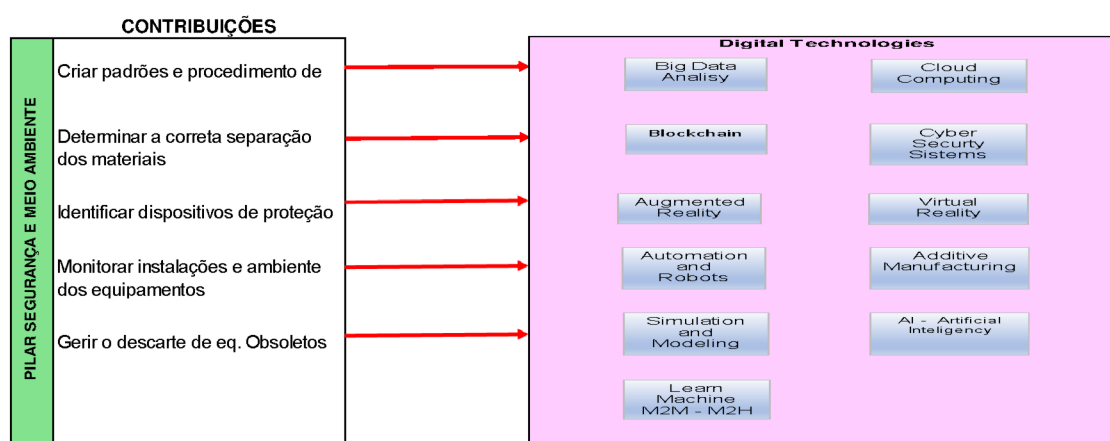
Figura 35 – Contribuições do Pilar Administração



#### 4.8.8 Pilar Segurança e Meio Ambiente

De grande importância, o Pilar Segurança e Meio Ambiente, tem como finalidade assegurar o melhor desempenho das tecnologias digitais juntamente com as melhores práticas de segurança para os operadores, assim como gerir padrões e procedimentos de armazenamento e descarte de material, sem agredir o meio ambiente. Desta forma, a pesquisa demonstrou que as empresas participantes não tem uma estrutura consolidada, embora os colaboradores entrevistados demonstraram que é uma preocupação existente nas empresas. Desta forma, seguem as atividades referente ao Pilar Segurança e Meio Ambiente, que suportariam as melhores práticas nestas áreas.

Figura 36 – Contribuições do Pilar Segurança e Meio Ambiente



Através desta etapa de “revalidação” entre a RSL com a pesquisa de campo, demonstrou-se que as ações realizadas pelas empresas que participaram da pesquisa não agregaram atividades que suportariam as tecnologias digitais na fabricação mecânica e que desta forma as atividades identificadas na RSL e apresentadas nos itens 4.2 e 4.4, representam as atividades relacionadas a gestão da manutenção que suportariam as tecnologias digitais. Demonstrando que o Framework apresentado no item 4.4, contempla as atividades que contribuiriam para o suporte da manutenção produtiva total com as tecnologias digitais da indústria 4.0 na fabricação mecânica.

## 5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Após a análise dos resultados da pesquisa, percebeu-se que a aplicação das atividades de manutenção baseados no TPM contribuem para uma melhor confiabilidade e consistência no funcionamento das tecnologias da I4.0, bem como segundo Hemmati (2018), em qualquer equipamento e segmento fabril, transformando-se em vantagem competitiva na busca dos resultados e objetivos da empresa. Os participantes da pesquisa demonstraram ter esta visão de forma clara, porém, sem uma estruturação na gestão de manutenção de suas empresas.

Condizente com Shaffie et al. (2019), mesmo com ações individuais de forma corretiva e com qualquer atividade realizada na busca por melhoria, sem apresentação de estratégias e métodos nas atividades de manutenção não é possível ter uma garantia da disponibilidade e da confiabilidade das funções pré-definidas dos equipamentos.

A estruturação e evolução da manutenção para as tecnologias digitais, contemplando os 3 tipos de manutenção, permite um melhor acompanhamento dos equipamentos através dos planos de manutenção e, principalmente, pela condição do equipamento. Bousdekis et al. (2018) já apontava esse caminho.

As empresas no geral, percebido nessa pesquisa, almejam a realidade visionária de Nakajima (1998), com o uso de “Robôs de produção de Robôs”, com a utilização das novas tecnologias digitais, e com a implementação do TPM nas tecnologias digitais como uma estratégia que trará benefícios em produtividade, confiabilidade e qualidade. Porém, percebeu-se na pesquisa uma certa “inércia” em priorizar ações no TPM. Sahoo et al. (2020) complementa essa ideia incluindo benefícios nas administrativas como redução de custos, melhoria na segurança e desenvolvimento técnico dos colaboradores.

A pesquisa mostrou, ainda que superficialmente, que a aplicação de uma metodologia consolidada de TPM para este novo modelo industrial (I4.0), com a estruturação das ações para garantir a integração inteligente e instantânea entre máquinas/componentes, transmissão de dados e pessoas na cadeia de valor, se apresenta como uma vantagem competitiva para as indústrias e seus processos de fabricação.

A estruturação do TPM, através dos seus oito pilares, e a utilização dos seus conceitos direciona os novos caminhos para a produtividade dos componentes da I4.0. Assim como TPM é amplamente adotado para melhorar a estabilidade e a eficácia dos processos na maioria dos ambientes de fabricação, é relevante entender como as tecnologias I4.0 podem ser fundidas com as práticas do TPM. Tortorella et al. (2024) e apresentaram uma relação da I4.0 com as técnicas do TPM. Porém, não explorou a contribuição do TPM de forma desdobrada em atividades como a presente pesquisa.

Conforme o resultado da pesquisa, uma aplicação do TPM para as tecnologias digitais, permite que parâmetros de operação sejam monitorados, com registros e que sejam apresentados em uma métrica quantitativa primordial para medição do desempenho dos equipamentos (Tsarouhas, 2018), assim como os registros das intervenções, identificações das causas raiz e de indicadores mais usuais da manutenção como MTBF e MTTF. Esta rotina e cálculos dos indicadores demonstrariam de forma efetiva se as atividades de manutenção e seus acompanhamentos se mostram eficaz e as causas das falhas não estão se repetindo e na busca de soluções.

A I4.0 vem revolucionando a competitividade entre as empresas, transformando as relações de trabalho e como as pessoas se comunicam. As tecnologias digitais estão em um processo cada vez mais rápido de atualização e com isso gerando uma transformação digital dos processos de fabricação (Raja Santhi et al., 2023). A aplicação do TPM poderá direcionar e contribuir com o melhor desempenho das indústrias, empresas de hospedagem de tecnologia e até Startups, que dependem de *Big Data Analysis* e de *Cloud Computing*.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho consistiu em analisar a contribuição e suporte que a metodologia do TPM pode oferecer para as tecnologias digitais estruturantes da indústria 4.0. Esta análise foi realizada através de uma RSL – Revisão Sistemática da Literatura e através de uma pesquisa de campo para identificar o cenário atual para a gestão da manutenção nas tecnologias digitais.

Com as contribuições encontrada na RSL e com a demonstração do cenário da gestão da manutenção nas empresas que participaram da pesquisa, pode-se concluir que o objetivo geral da presente pesquisa foi alcançado.

O primeiro objetivo específico desta pesquisa foi realizar uma RSL – Revisão Sistemática da Literatura, através de uma busca específica nos bancos de dados acadêmicos e com as combinações entre os grupos de palavras chaves descritos no protocolo da pesquisa. Este estudo proporcionou a identificação das contribuições do TPM para as tecnologias digitais da indústria 4.0, conforme demonstrado nos resultados desta pesquisa.

Com a identificação das contribuições e suporte da metodologia TPM, uma avaliação detalhada dos conceitos do TPM e os relacionando com as tecnologias digitais da indústria 4.0, foi possível identificar a aderência dos pilares do TPM com cada tecnologia digital, o que proporcionou um maior detalhamento das atividades voltadas às tecnologias digitais, assim como a representação gráfica dos pilares do TPM para cada tecnologia digital e também para o desenvolvimento de um *Framework* teórico, o qual demonstre as principais atividades dos pilares do TPM para aplicação nas tecnologias digitais estruturantes da indústria 4.0.

Desta forma, o segundo objetivo específico da pesquisa, que era preparar o *Framework* com as contribuições, foi realizado com êxito.

Por fim, o terceiro objetivo específico foi identificar o cenário atual na gestão da manutenção das tecnologias digitais estruturantes, através de uma pesquisa de campo. Para esta identificação foram realizadas entrevistas com os funcionários das empresas participantes. Com o auxílio de um questionário apresentado aos participantes, das entrevistas realizadas e dos questionamentos complementares, foi possível identificar o cenário de cada empresa e suas particularidades nas ações de manutenção.

Outro ponto importante durante a execução da pesquisa de campo, foi a apresentação da metodologia do TPM para os participantes, demonstrando a sistemática de implementação e os conceitos de cada pilar para que os participantes visualizassem possíveis utilizações e melhorias com a utilização do TPM.

Na execução da RSL e do estudo dos artigos encontrados, verificou-se que a abordagem entre a manutenção ou um sistema de gestão de manutenção com base no TPM para a I4.0 ainda é pouco explorado. Outro fator importante identificado foi que as próprias tecnologias digitais colaboram para as identificações de possíveis falhas na operação dos equipamentos de fabricação mecânica, assim como nelas próprias através do monitoramento contínuo.

A utilização da Manutenção Preditiva, através de tecnologias modernas e ciclos de avaliações foi apresentada com uma das formas de controle das condições dos equipamentos e componentes físicos que compõem as tecnologias digitais.

Na pesquisa qualitativa, realizada com empresas que utilizam as tecnologias digitais, foi possível identificar um cenário de ações corretivas (reativas) de manutenção, onde 100% das empresas participantes atuam de forma pontual frente a paradas ou queda de desempenho. Também foi percebido que as tecnologias digitais possuem formas de controles de suas condições operacionais em todas as empresas estudadas, mas que variações e falhas não são registradas e tampouco avaliadas para identificação das causas.

Os participantes das pesquisas identificaram, através das entrevistas realizadas, a necessidade de uma estratégia de gestão da manutenção das tecnologias digitais e demonstraram que a metodologia do TPM poderia ser utilizada para contribuir com o melhor desempenho das tecnologias digitais.

Percebeu-se na presente pesquisa que os processos de fabricação estão cada vez mais digitais e, para acompanhar essa transformação digital, as estratégias de manutenção também necessitarão acompanhar esta revolução. Assim, essas estratégias utilizarão as próprias tecnologias digitais para melhorar as suas avaliações em tempo real, através de simulações, do uso de imagem e outras tecnologias.

Diante dos resultados apresentados na RSL, assim como na pesquisa de campo, podemos identificar as contribuições da pesquisa em questão com as ações da metodologia do TPM, amplamente aplicadas na fabricação mecânica e sendo possível aplica-las nas tecnologias digitais. A preparação do Framework que servirá de base para nortear pesquisas futuras envolvendo as atividades que contribuirão para o melhor desempenho das tecnologias digitais. A própria aplicação de técnicas digitais modernas para avaliar e controlar o desempenho dos componentes das tecnologias estruturantes da Indústria 4.0.

No âmbito da pesquisa de campo, a análise realizada demonstra que: (i) a importância e a necessidade de uma definição de estratégia para a gestão de manutenção dos ativos e tecnologias digitais; (ii) a aplicação da metodologia do TPM com uma possibilidade para melhorar o desempenho das tecnologias digitais estruturantes da Indústria 4.0 e controle dos seus componentes e dados, que proporcionariam melhores resultados competitivos e de sustentabilidade para as empresas; (iii) o cenário cada vez mais dinâmico para avaliações e tomadas de decisões com a utilização das próprias tecnologias modernas para definir as estratégias e ações a serem adotadas.

Um cenário organizacional para gerenciar a manutenção através do TPM em um ambiente com tecnologias digitais ainda é pouco explorado. Este foi o principal motivador para a realização desta pesquisa, visando demonstrar a viabilidade da aplicação desta metodologia de gestão dos equipamentos e componentes das tecnologias digitais estruturantes da Indústria 4.0.

## **7 OPORTUNIDADES FUTURAS**

O estudo da colaboração do TPM nos processos de fabricação das indústrias 4.0, além de demonstrar sua aplicabilidade, nos indicam possibilidades de novos trabalhos futuros, tais como:

- Estudo e identificação das “Perdas” para as tecnologias digitais da I4.0;
- Aplicação de técnicas preditivas para hardware, visando monitoramento das condições operacionais.
- Estudo da Eficácia Global do Equipamento (OEE), para as tecnologias digitais da I4.0.

## REFERÊNCIAS

### REFERÊNCIAS NOMINAIS

ACETO, Giuseppe; PERSICO, Valerio; PESCAPÉ, Antônio. A survey on information and communication technologies for industry 4.0: State-of-the-art, taxonomies, perspectives, and challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**. Percentil Scopus 99%; v. 21, n. 4, p. 3467-3501, 2019. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2938259>

AHUJA, Inderpreet P. S.; KHAMBA, Jaimal S. Total productive maintenance: literature review and directions. **International Journal of Quality & Reliability Management**. Percentil Scopus 83%, v. 25; n.7, p. 709-756, 2008. <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>

AKBARI, Mohammadreza; HA, Nghiep; KOK, Seng. A systematic review of AR/VR in operations and supply chain management: maturity, current trends and future directions. **Journal of Global Operations and Strategic Sourcing**. Percentil Scopus 79%, v. 15, n. 4, p. 534-565, 2022. <https://doi.org/10.1108/JGOSS-09-2021-0078>

ALCÁCER, Vítor; CRUZ-MACHADO, Virgílio. Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. **Engineering science and technology, an international journal**. Percentil Scopus 97%; v. 22, n. 3, p. 899-919, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>

ALESSIO, Franco. et al. Design of additively manufactured moulds for expanded polymers. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Percentil Scopus 80%, v. 125, n. 11-12, p. 4899-4908, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10936-x>

APARICIO, Manuela; BACAO, Fernando; OLIVEIRA, Tiago. An e-learning theoretical framework. **An e-learning theoretical framework**. Percentil Scopus 93%, v. 19, n. 1, p. 292-307, 2016.

AQUINO, Sara. et al. Augmented reality for industrial services provision: the factors influencing a successful adoption in manufacturing companies. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Percentil Scopus 97%, v. 34, n. 4, p. 601-620, 2023. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2022-0077>

BATTAGLIA, Daniele. et al. Full, hybrid and platform complementarity: Exploring the industry 4.0 technology-performance link. **International Journal of Production Economics**. Percentil Scopus 99%, v. 263, p. 108949, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108949>

BELLANTUONO, Nicola. et al. Digital transformation models for the I4. 0 transition: Lessons from the change management literature. **Sustainability**. Percentil Scopus 83%, v. 13, n. 23, p. 12941, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132312941>

BOUSDEKIS, Alexandros. et al. Review, analysis and synthesis of prognostic-based decision support methods for condition based maintenance. **Journal of Intelligent Manufacturing**. Percentil Scopus 95%, v. 29, n. 6, p. 1303-1316, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1179-5>

BOVENZI, Giampaolo. et al. Blockchain Performance in Industry 4.0: Drivers, use cases, and future directions. **Journal of Industrial Information Integration**. Percentil Scopus 98%, v. 36, 100513, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100513>

BS EN 13306:2010. Maintenance. **Maintenance Terminology**, 2010.

BUTT, Javaid. A conceptual framework to support digital transformation in manufacturing using an integrated business process management approach. **Designs**. Percentil Scopus 67%, v. 4, n. 3, p. 17, 2020. <https://doi.org/10.3390/designs4030017>

CHAUREY, Sudhir. et al. A Review on Identification of Total Productive Maintenance Critical Success Factors for Effective Implementation in the Manufacturing Sector. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**. Percentil Scopus 54%, v. 29, n. 1, p. 114-135, 2023. <https://doi.org/10.1108/JQME-11-2020-0118>

DAVIS, Nathaniel. et al. 4th industrial revolution design through lean foundation. **Procedia Cirp**. Percentil Scopus 59%, v. 91, p. 306-311, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.102>

DE OLIVEIRA-DIAS, Diéssica. et al. Implications of using Industry 4.0 bases technologies for lean and agile supply chains and performance. **International Journal of Production Economics**. Percentil Scopus 99%, v. 262, 108916, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108916>

DEBRUINE, Lisa M.; BARR, Dale J. Understanding mixed-effects models through data simulation. **Advances in Methods and Practices in Psychological Science**. Percentil Scopus 98%, v. 4, n. 1, 2515245920965119, 2021. <https://doi.org/10.1177/2515245920965119>

DEY, Somdip. et al. SmartNoshWaste: Using blockchain, machine learning, cloud computing and QR code to reduce food waste in decentralized web 3.0 enabled smart cities. **Smart Cities**. Percentil Scopus 94%, v. 5, n. 1, p. 162-176, 2022. <https://doi.org/10.3390/smartcities5010011>

DI MODICA, Giuseppe; FOSCHINI, Luca. A Survey on the Use of Lightweight Virtualization in I4.0 Manufacturing Environments. **Journal of Network and Systems Management**. Percentil Scopus 74%, v. 31, n. 2, p. 37, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10922-023-09725-4>

DJEHAICHE, Rania. et al. Adaptive Control of IoT/M2M Devices in Smart Buildings Using Heterogeneous Wireless Networks. **IEEE Sensors Journal**. Percentil Scopus 90%, v. 23, n. 7, 7836-7849, 2023. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3247007>

DOS REIS, M. D. O. et al. A TPM strategy implementation in an automotive production line through loss reduction. **Procedia Manufacturing**. Percentil Scopus 67%, v. 38, p. 908-915, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.173>

EN 13306:2010. **Maintenance terminology**, 2017.

FOGLIATTO, Flavio S.; RIBEIRO, José Luís D.; **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Elsevier Editora Ltda., 2011.

FONSECA, João José S. **Apostila de metodologia da pesquisa científica**. João José Saraiva da Fonseca, 2002.

FREDERICO, Guilherme F. et al. Impact of I4.0 technologies and their interoperability on performance: future pathways for supply chain resilience post-COVID-19. **The International Journal of Logistics Management**. Percentil Scopus 87%, v. 34, n. 4, p. 1020-1049, 2023. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2021-0181>

FULBER-GARCIA, Vinicius. et al. Customizable Mapping of Virtualized Network Services in Multi-datacenter Environments Based on Genetic Metaheuristics. **Journal of Network and Systems Management**. Percentil Scopus 74%, v. 31, n. 4, p. 71, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10922-023-09760-1>

GERHARDT, Tatiana E. et al. Estrutura do projeto de pesquisa. Métodos de pesquisa. **UFRGS**. Porto Alegre, 2009.

HAFIDI, Mohamed M. et al. Semantic web and machine learning techniques addressing semantic interoperability in Industry 4.0. **International Journal of Web Information Systems**. . Percentil Scopus 61%, v. 19, n. 3/4, p. 157-172, 2023. <https://doi.org/10.1108/IJWIS-03-2023-0046>

HEMMATI, Narges. et al. Maintenance policy selection: a fuzzy-ANP approach. **Journal of Manufacturing Technology Management**. Percentil Scopus 94%, v. 29, n. 5, p. 1253-1268, 2018. <https://doi.org/10.1108/JMTM-06-2017-0109>

HENG, Zhang. et al. Automatic estimate of OEE considering uncertainty. **Procedia CIRP**. Percentil Scopus 67%, v. 81, p. 630-635, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.167>

JAIN, Abhishek; BHATTI, Rajbir; SINGH, Harwinder. Total productive maintenance (TPM) implementation practice: a literature review and directions. **International Journal of Lean Six Sigma**. Percentil Scopus 89%, v. 5, n. 3, p. 293-323, 2014. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2013-0032>

JAN, Zohaib. et al. Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. **Expert Systems with Applications**. Percentil Scopus 96%, 119456, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119456>

KOH, Lenny; ORZES, Guido; JIA, Fu Jeff. The fourth industrial revolution (Industry 4.0): technologies disruption on operations and supply chain management. **International Journal of Operations & Production Management**. Percentil Scopus 94%, v. 39, n. 6/7/8, p. 817-828. 2019. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2019-788>

LARDO, Alessandra. et al. The perspective of capability providers in creating a sustainable I4.0 environment. **Management Decision**. Percentil Scopus 93%, v. 58, n. 8, p. 1759-1777, 2020. <https://doi.org/10.1108/MD-09-2019-1333>

LIU, Mengnan. et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. **Journal of Manufacturing Systems**. Percentil Scopus 96%, v. 58, p. 346-361, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>

LUPI, Francesco. et al. Blockchain-based shared additive manufacturing. **Computers & Industrial Engineering**. Percentil Scopus 95%, v. 183, 109497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109497>

MEDYŃSKI, Daniel. et al. Digital standardization of lean manufacturing tools according to industry 4.0 concept. **Applied Sciences**. Percentil Scopus 83%, v. 13, n. 10, 6259, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13106259>

NAKAJIMA, Seiiche. **Introduction to TPM**. Productivity Press. 1988.

NBR 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade**, 1994.

NORD, Jeretta H.; KOOHANG, Alex; PALISZKIEWICZ, Joanna. The Internet of Things: Review and theoretical framework. **Expert Systems with Applications**. Percentil Scopus 96%, v. 133, p. 97-108, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.014>

NUGRAHA, Yudhistira; MARTIN, Andrew. Cybersecurity service level agreements: understanding government data confidentiality requirements. **Journal of Cybersecurity**. Percentil Scopus 97%, v. 8, n. 1, tyac004, 2022. <https://doi.org/10.1093/cybsec/tyac004>

OZTEMEL, Ercan; GURSEV, Samet. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**. Percentil Scopus 96%, v. 31, n. 1, p. 127-182, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>

PANAGOU, Sotirios; FRUGGIERO, Fabio; LAMBIASE, Alfredo. The Sustainable Role of Human Factor in I4.0 scenarios. **Procedia Computer Science**. Percentil Scopus 70%, v. 180, p. 1013-1023, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.354>

PATIL, Anchal. et al. Big data-Industry 4.0 readiness factors for sustainable supply chain management: Towards circularity. **Computers and Industrial Engineering**. Percentil Scopus 96%, v. 178, 109109, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109109>

PINTO, Alan K.; XAVIER, Júlio A. N. **Manutenção: função estratégica**. 3ª Ed. Qualitymark Ed., 2009.

PINTO, G. et al. TPM implementation and maintenance strategic plan—a case study. **Procedia Manufacturing**. Percentil Scopus 68%, v. 51, p. 1423-1430, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.198>

PINTO, Gustavo F. C. et al. Implementing a maintenance strategic plan using TPM methodology. **International Journal of Industrial Engineering and Management**. Percentil Scopus 67%, v. 11, n. 3, p. 192-204, 2020. <http://dx.doi.org/10.24867/IJIE-M-2020-3-264>

RAJ, Alok. et al. Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. **International Journal of Production Economics**. Percentil Scopus 98%, v. 224, 107546, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>

RASHEED, Fareeha; WAHID, Abdul. Learning style detection in E-learning systems using machine learning techniques. **Expert Systems with Applications**. Percentil Scopus 96%, v. 174, 114774, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114774>

RELJIĆ, Vule. et al. Augmented reality applications in industry 4.0 environment. **Applied Sciences**. Percentil Scopus 75%, v. 11, n. 12, 5592, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11125592>

RIBEIRO, Jorge. et al. Robotic process automation and artificial intelligence in industry 4.0—a literature review. **Procedia Computer Science**. Percentil Scopus 68%, v. 181, p. 51-58, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.104>

ROSADO, David G. et al. Managing cybersecurity risks of cyber-physical systems: The MARISMA-CPS pattern. **Computers in Industry**. Percentil Scopus 99%, v. 142, 103715, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103715>

ROSSETTI, Ana Paula L. et al. Identifying Industry 4.0 technologies enablers for knowledge management—a scoping review. **The TQM Journal**. Percentil Scopus 86%, v. 36, n. 1, p. 340-360, 2024. <https://doi.org/10.1108/TQM-05-2022-0173>

SACOMANO, José B.; **Industria 4.0 – Conceitos e Fundamentos**. Editora Edgard Blucher, 2018.

SAHARA, Siti. et al. Graduate competencies based on the aspect of organizational activity in industry 4.0. **Int J Eval & Res Educ ISSN**. Percentil Scopus 60%, v. 13, n. 2, p. 652-662, 2024. <https://doi.org/10.11591/ijere.v13i2.25803>

SAHOO, Saumyaranjan; YADAV, Sudhir. Influences of TPM and TQM practices on performance of engineering product and component manufacturers. **Procedia Manufacturing**. Percentil Scopus 68, v. 43, p. 728-735, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.111>

SALVADORINHO, Juliana; TEIXEIRA, Leonor. Organizational knowledge in the I4.0 using BPMN: a case study. **Procedia Computer Science**. Percentil Scopus 70%, v. 181, p. 981-988, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.266>

SAMADHIYA, Ashutosh; AGRAWAL, Rajat; GARZA-REYES, Jose Arturo. Integrating industry 4.0 and total productive maintenance for global sustainability. **The TQM Journal**. Percentil Scopus 86%, v. 36, n. 1, p. 24-50, 2024. <https://doi.org/10.1108/TQM-05-2022-0164>

SAUCEDO-MARTÍNEZ, Jania A. et al. Industry 4.0 framework for management and operations: a review. **Journal of ambient intelligence and humanized computing**. Percentil Scopus 85%; v. 9, n. 3, p. 789-801, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0533-1>

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução Industrial**. Tradução: Daniel Moreira Miranda. Edipro, 2016.

SHAFIEE, Mahmood; SØRENSEN, J. Dalsgaard. Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies. **Reliability Engineering & System Safety**. Percentil Scopus 97%, v. 192, p. 105993, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.10.025>

MANTA-COSTA, Alexandre et al. Machine Learning Applications in Manufacturing-Challenges, Trends, and Future Directions. **IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society**, Percentil Scopus 91%, 2024. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2024.3431240>

ALATAWI, Hibah et al. Augmented Reality-Assisted Deep Reinforcement Learning-Based Model towards Industrial Training and Maintenance for NanoDrop Spectrophotometer. **Sensors**, Percentil Scopus 45%, v. 23, n. 13, p. 6024, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23136024>

TANCREDI, Giovanni Paolo; VIGNALI, Giuseppe. Machine Learning tool to prevent and control Bag Filter clogging. **Procedia Computer Science**, Percentil Scopus 70%, v. 232, p. 2358-2365, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.054>

SHRIVASTAVA, Anurag. et al. IoT Based RFID Attendance Monitoring System of Students using Arduino ESP8266 & Adafruit. io on Defined Area. **Cybernetics and Systems**. Percentil Scopus 98%, v.12, n. 12, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.1080/01969722.2023.2166243>

SILVA, Felipe. et al. A field study on the impacts of implementing concepts and elements of industry 4.0 in the biopharmaceutical sector. **Journal of Open**

**Innovation: Technology, Market, and Complexity**. Percentil Scopus 95%, v. 6, n. 4, p. 175, 2020. <https://doi.org/10.3390/joitmc6040175>

SIMONETTO, Marco; ARENA, Simone; PERON, Mirco. A methodological framework to integrate motion capture system and virtual reality for assembly system 4.0 workplace design. **Safety Science**. Percentil Scopus 97%, v. 146, 105561, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105561>

SINGH, Jagdeep; SINGH, Harwinder; SHARMA, Vinayak. Success of TPM Concept in a manufacturing unit - a case of study. **International Journal of Productivity and Performance Management**. Percentil Scopus 82%, v.67, n.3, p. 536-549; 2018. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2017-0003>

STRUPCZEWSKI, Grzegorz. Defining cyber risk. **Safety science**. Percentil Scopus 97%, v. 135, 105143, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105143>

THAYYIB, P. V. et al. State-of-the-Art of Artificial Intelligence and Big Data Analytics Reviews in Five Different Domains: A Bibliometric Summary. **Sustainability**. Percentil Scopus 83%, v. 15, n. 5, 4026, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15054026>

TORTORELLA, Guilherme L. et al. Digitalization of maintenance: Exploratory study on the adoption of Industry 4.0 technologies and total productive maintenance practices. **Production Planning & Control**. Percentil Scopus 96%, v. 35, n. 4, p. 352-372, 2024. <https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2083996>

TORTORELLA, Guilherme L. et al. Integration of industry 4.0 technologies into total productive maintenance practices. **International Journal of Production Economics**. Percentil Scopus 99%, v. 240, 108224, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108224>

TORTORELLA, Guilherme. et al. The impact of Industry 4.0 on the relationship between TPM and maintenance performance. **Journal of Manufacturing Technology Management**. Percentil Scopus 97%, v. 33, n. 3, p. 489-520, 2022. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2021-0399>

TSAROUHAS, Panagiotis. Improving operation of the croissant production line through overall equipment effectiveness (OEE): A case study. **International journal of productivity and performance management**. Percentil Scopus 82%, v. 68, n. 1, p. 88-108, 2018. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2018-0060>

ULLAH, Farman; BILAL, Muhammad; YOON, Su-Kyung. Intelligent time-series forecasting framework for non-linear dynamic workload and resource prediction in cloud. **Computer Networks**. Percentil Scopus 92%, v. 225, 109653, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109653>

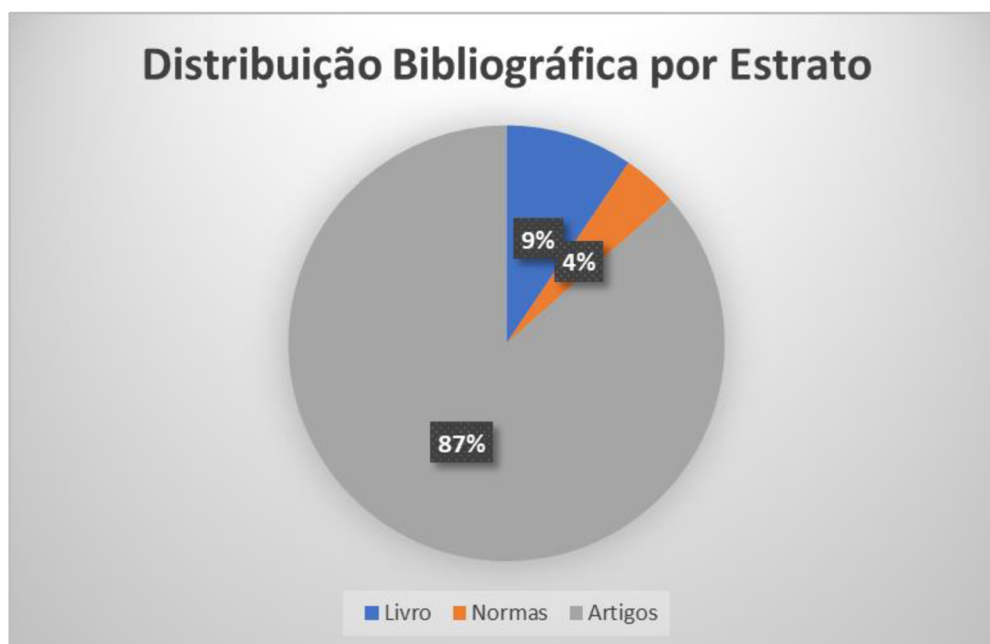
VARPIO, Lara. et al. The distinctions between theory, theoretical framework, and conceptual framework. **Academic Medicine**. Percentil Scopus 93%, v. 95, n. 7, p. 989-994, 2020. <https://doi.org/10.1097/acm.0000000000003075>

XIANG, Zhang Tian; CHIN, Jeng Feng. Implementing total productive maintenance in a manufacturing small or medium-sized enterprise. **Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)**. Percentil Scopus 64%, v. 14, n. 2, p. 152-175, 2021. <https://doi.org/10.3926/jiem.3286>

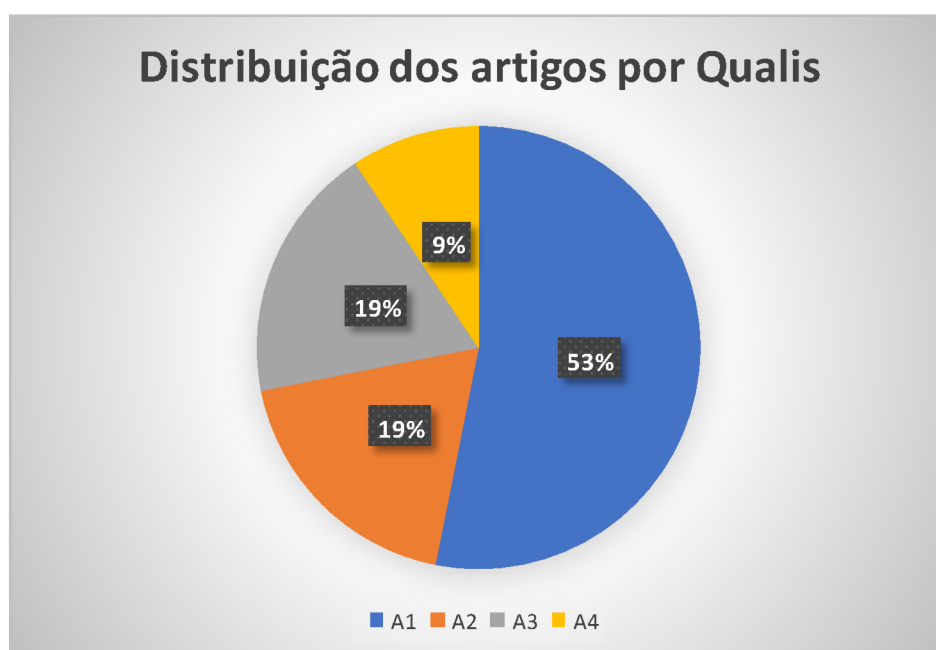
YAZDI, Poorya G.; AZIZI, Aydin; HASHEMIPOUR, Majid. An empirical investigation of the relationship between overall equipment efficiency (OEE) and manufacturing sustainability in industry 4.0 with time study approach. **Sustainability**. Percentil Scopus 83%, v. 10, n. 9, 3031, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10093031>

ZARRIN, Javad. et al. Blockchain for decentralization of internet: prospects, trends, and challenges. **Cluster Computing**. Percentil Scopus 80%, v. 24, n. 4, p. 2841-2866, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10586-021-03301-8>

## REFERÊNCIAS POR ESTRATO



## REFERÊNCIAS POR QUALIS



## REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS

