

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
CAMPUS TAQUARAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA MONITORAMENTO
PRESCRITIVO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS DE
PROCESSOS INDUSTRIAIS NA INDÚSTRIA 4.0**

LUIZ GONZAGA DA COSTA NETO

ORIENTADOR:

PROF. DR. FERNANDO CELSO DE CAMPOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEP, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção.

PIRACICABA
2023

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecária: Michelle Cristina de Oliveira - CRB-8/10810.

| | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C838p | <p>Costa Neto, Luiz Gonzaga da</p> <p>Proposta de um Método para Monitoramento Prescritivo de Máquinas e Equipamentos de Processos Industriais na Indústria 4.0. / Luiz Gonzaga da Costa Neto. - 2023. 97fls.; 30 cm.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Fernando Celso de Campos Tese (Doutorado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Piracicaba, 2023.</p> <p>1. Indústria 4.0. 2. Manutenção Inteligente. 3. Manutenção 4.0. 4. Manutenção Prescritiva. 5. Monitoramento Prescritivo. 6. Método. I. Costa Neto, Luiz Gonzaga da. II. Título.</p> <p>CDD – 670.1</p> |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA MONITORAMENTO
PRESCRITIVO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS DE PROCESSOS
INDUSTRIAIS NA INDÚSTRIA 4.0**

LUIZ GONZAGA DA COSTA NETO

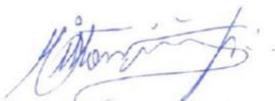
Tese de Doutorado aprovada em 14 de dezembro de 2023, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:



Prof. Dr. Fernando Celso de Campos
(Presidente e Orientador – PPGEP/UNIMEP)



Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon
(Membro interno – PPGEP/UNIMEP)



Prof. Dr. Milton Vieira Jr.
(Membro interno – PPGEP/UNIMEP)



Prof. Dr. Otávio José de Oliveira
(Membro externo – PPGEP/UNESP-GUARÁ)



Prof. Dr. Antonio Carlos Pacagnella Junior
(Membro externo – PPGEP/UNICAMP-FCA)

À

Minha Família

Especialmente a minha esposa Jiana e minha
filha Bárbara.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de Vida e Saúde aqui na terra.

Aos meus pais Gervásio Gonzaga e Ricardina Rosa (In memoriam), por mostrar o caminho da Vida e da Escola.

Ao professor Dr. Fernando Celso de Campos pela dedicação, orientação, compreensão e incentivo dispensado ao desenvolvimento dessa Tese.

Aos professores: Prof. Dr. Fernando Celso de Campos, Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon, Prof. Dr. Manoel Méndez, pela dedicação e contribuição dos conhecimentos nas disciplinas cursadas.

Aos Professores presentes na bancada examinadora: Prof. Dr. Fernando Celso de Campos, Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon, Prof. Dr. Milton Vieira Jr., Prof. Dr. Otávio José de Oliveira, Prof. Dr. Antonio Carlos Pacagnella Junior, pela contribuição dos conhecimentos para a defesa dessa Tese.

Aos meus amigos de sala de aula, pelas energias positivas e conhecimentos durante as disciplinas cursadas.

À bolsa concedida, pois a presente Tese foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

DISCIPLINA

“Meu objetivo é ganhar e, para isso, tenho que dar sempre o melhor de mim”.

Ayrton Senna

(1960-1994)

Piloto de Fórmula 1

COSTA NETO, Luiz Gonzaga da. **PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA MONITORAMENTO PRESCRITIVO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS DE PROCESSOS INDUSTRIAIS NA INDÚSTRIA 4.0.** 2023. 97 f Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação – PPGE – UNIMEP, Universidade Metodista de Piracicaba.

RESUMO

As atividades de monitoramentos de máquinas e equipamentos de processo industrial acontecem pela necessidade de mantê-los em condições satisfatórias, proporcionando disponibilidade e confiabilidade operacional. No entanto, mesmo com a manutenção preditiva, sendo uma condição favorável na identificação do ponto potencial de falha, tanto *off-line* como *on-line* para uma análise de tendência de falha, não toma a ação automática para a falha identificada. Dessa forma, existem oportunidades no contexto da Indústria 4.0 (I4.0) serem exploradas caracterizando uma lacuna para a pesquisa, buscando a tomada de ação automática para a falha identificada e o termo manutenção prescritiva passar a ser atividade de monitoramento prescritivo, que poderá acompanhar os parâmetros das variáveis: frequência, pressão e temperatura em tempo real *on-line* contínuo por meio de sensores conectados nas máquinas e equipamentos rotativos e estáticos de processos industriais. O objetivo principal dessa Tese é propor um método para monitoramento prescritivo capaz de proporcionar disponibilidade e a confiabilidade operacional de máquinas e equipamentos de processos industriais, tais como: equipamentos rotativos e estáticos na I4.0, mantendo o equipamento operando sem evolução da falha identificada. A abordagem metodológica constituiu em uma pesquisa bibliográfica, pesquisa de campo (documental e entrevistas) com fornecedores de sensores, elaboração de um método para monitoramento prescritivo e planejamento de avaliação da aplicabilidade do método. Os possíveis resultados alcançados com a aplicação desse método proposto são: manter o equipamento operando dentro dos padrões operacionais de processos aceitáveis sem evolução da falha identificada; aumentar a disponibilidade e a confiabilidade operacional; prever a execução das atividades de manutenção preventiva de condição somente na real necessidade. Conclui-se que a contribuição para a indústria em geral, ficou demonstrado pela aplicabilidade do método proposto por meio de profissionais de 4 (quatro) empresas de segmentos diferentes, bem como dos novos conceitos apresentados, além dos dois novos indicadores. A contribuição acadêmica foi feita pela demonstração da situação atual da literatura em relação à abordagem no tema na I4.0, bem como pela pesquisa de campo e pela avaliação dos especialistas da área de manutenção, confirmando-se o avanço do conhecimento frente à situação de mercado e da área industrial na atualidade.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Manutenção Inteligente, Manutenção 4.0, Manutenção Prescritiva, Monitoramento Prescritivo, Método.

COSTA NETO, Luiz Gonzaga da. **PROPOSAL FOR A METHOD FOR PRESCRIPTIVE MONITORING OF INDUSTRIAL PROCESS MACHINERY AND EQUIPMENT IN INDUSTRY 4.0**. 2023. 97 f Thesis (Doctorate) - Postgraduate Program - PPGEF - UNIMEP, Methodist University of Piracicaba.

ABSTRACT

Monitoring activities for machines and industrial process equipment occur due to the need to maintain them in satisfactory conditions, providing availability and operational reliability. However, even with predictive maintenance, being a favorable condition in identifying the potential point of failure, both offline and online for a failure trend analysis, it does not take automatic action for the identified failure. In this way, there are opportunities in the context of Industry 4.0 (I4.0) to be explored, characterizing a gap for research, seeking to take automatic action for the identified failure and the term prescriptive maintenance becomes a prescriptive monitoring activity, which can accompany the parameters of the variables: frequency, pressure and temperature in continuous online real time through sensors connected to machines and rotating and static equipment in industrial processes. The main objective of this Thesis is to propose a method for prescriptive monitoring capable of providing availability and operational reliability of industrial process machines and equipment, such as: rotating and static equipment in I4.0, keeping the equipment operating without evolution of the identified fault. The methodological approach consisted of bibliographical research, field research (documentary and interviews) with sensor suppliers, development of a method for prescriptive monitoring and planning to evaluate the applicability of the method. The possible results achieved with the application of this proposed method are: keeping the equipment operating within the operational standards of acceptable processes without evolution of the identified failure; increase operational availability and reliability; provide for the execution of preventive condition maintenance activities only when truly necessary. It is concluded that the contribution to the industry in general was demonstrated by the applicability of the proposed method through professionals from 4 (four) companies from different segments, as well as the new concepts presented, in addition to the two new indicators. The academic contribution was made by demonstrating the current situation of the literature in relation to the approach to the topic in I4.0, as well as through field research and the evaluation of specialists in the maintenance area, confirming the advancement of knowledge in the face of the situation of market and industrial area today.

Keywords: Industry 4.0, Smart Maintenance. Maintenance 4.0, Prescriptive Maintenance, Prescriptive Monitoring, Method.

Sumário

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| LISTA DE FIGURAS | I |
| LISTA DE QUADROS | II |
| LISTA DE TABELAS | III |
| Lista de Equações..... | IV |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 14 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA..... | 16 |
| 1.3. QUESTÃO DE PESQUISA..... | 16 |
| 1.4. OBJETIVO GERAL..... | 17 |
| 1.5. VISÃO GERAL DA PESQUISA | 17 |
| 1.6. ESTRUTURA GERAL DO TRABALHO | 18 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 20 |
| 2.1. INDÚSTRIA 4.0 | 20 |
| 2.2. MANUTENÇÃO | 24 |
| 2.3. MANUTENÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0 | 30 |
| 3. MÉTODO DE PESQUISA..... | 53 |
| 3.1. ESTRUTURA DA CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA | 53 |
| 3.2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA | 55 |
| 3.2.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SEM USO DE PROTOCOLO DE PESQUISA | 55 |
| 3.2.2. REVISÃO NARRATIVA..... | 56 |
| 3.2.3. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA | 56 |
| 3.2.4. PESQUISA E REFINAMENTO | 56 |
| 3.3. PESQUISA DE CAMPO (DOCUMENTAL E ENTREVISTAS) COM FORNECEDORES DE SENSORES | 59 |
| 3.4. PLANEJAMENTO DA AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO POR ESPECIALISTAS DA ÁREA DE MANUTENÇÃO..... | 61 |
| 4. PROPOSTA E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA MONITORAMENTO PRESCRITIVO..... | 63 |
| 4.1. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO..... | 63 |
| 4.2. PASSO 1 (P1): MACROFLUXOGRAMA | 64 |
| 4.3. PASSO 2 (P2): ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO | 66 |
| 4.4. PASSO 3 (P3): ATIVIDADES DE MONITORAMENTO..... | 68 |
| 4.5. PASSO 4 (P4): CURVA O-P..... | 70 |
| 4.5.1. FLUXOGRAMA DA CURVA O-P..... | 72 |
| 4.6. INDICADORES DE DESEMPENHO | 74 |
| 4.6.1. INDICADOR DA ATIVIDADE DE MONITORAMENTO PRESCRITIVO (MPRC) | 74 |
| 4.6.2. INDICADOR DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CONDIÇÃO (MPC) | 74 |
| 5. DISCUSSÃO E APLICABILIDADE PARA O MONITORAMENTO PRESCRITIVO | 76 |
| 5.1. APLICABILIDADE DO MÉTODO PARA MONITORAMENTO PRESCRITIVO | 76 |
| 5.1.1. Atividade de Monitoramento Prescritivo..... | 77 |
| 5.1.1.1. Equipamentos Rotativos..... | 77 |
| 5.1.1.2. Equipamentos Estáticos..... | 78 |
| 5.2. APLICABILIDADE DOS INDICADORES DE DESEMPENHO | 79 |
| 5.2.1. INDICADOR DA ATIVIDADE DE MONITORAMENTO PRESCRITIVO (MPRC) | 80 |
| 5.2.2. INDICADOR DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CONDIÇÃO (MPC) | 81 |
| 5.3. AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO POR ESPECIALISTAS DA ÁREA DE MANUTENÇÃO | 82 |
| 5.4. IMPLICAÇÕES PARA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO..... | 85 |
| 6. CONCLUSÃO | 86 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 88 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1: VISÃO GERAL DA PESQUISA..... | 18 |
| FIGURA 2: FLUXOGRAMA DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 20 |
| FIGURA 3: FASES CRONOLÓGICAS DA ANÁLISE DE MANUTENÇÃO..... | 36 |
| FIGURA 4: MATRIZ DE MATURIDADE EM MANUTENÇÃO PREDITIVA..... | 38 |
| FIGURA 5: ESTRUTURA DA CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA..... | 54 |
| FIGURA 6: MICROFLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DA MANUTENÇÃO/MONITORAMENTO..... | 65 |
| FIGURA 7: ATIVIDADES DA MANUTENÇÃO..... | 66 |
| FIGURA 8: DETALHE DO PASSO 2 (P2)..... | 67 |
| FIGURA 9: ATIVIDADES DE MONITORAMENTO..... | 68 |
| FIGURA 10: DETALHE DO PASSO 3 (P3)..... | 70 |
| FIGURA 11: CURVA O-P..... | 71 |
| FIGURA 12: FLUXOGRAMA DA CURVA O-P..... | 72 |
| FIGURA 13: DETALHE DO PASSO 4 (P4)..... | 73 |
| FIGURA 14: EQUIPAMENTO ROTATIVO E SEU FLUXOGRAMA..... | 78 |
| FIGURA 15: EQUIPAMENTO ESTÁTICO E SEU FLUXOGRAMA..... | 79 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| QUADRO 1: CATEGORIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO | 33 |
| QUADRO 2: FUNÇÃO DE CAPACIDADE DE MAQUINA | 34 |
| QUADRO 3: CONCEITOS, DEFINIÇÕES E ATRIBUTOS | 40 |
| QUADRO 4: PESQUISA SEM USO DE POTOCOLO | 55 |
| QUADRO 5: PROTOCOLO DE PESQUISA..... | 58 |
| QUADRO 6: PESQUISA DE CAMPO COM EMPRESA DE SENSORES | 59 |
| QUADRO 7: EMPRESAS E SEU ESPECIALISTAS..... | 82 |
| QUADRO 8: RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS DA GESTÃO 1 | 83 |
| QUADRO 9: RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS DA GESTÃO 2 | 83 |
| QUADRO 10: RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS DA GESTÃO 3 | 84 |
| QUADRO 11: RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS DA GESTÃO 4 | 84 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1: ANÁLISES DAS PALAVRAS-CHAVE | 47 |
| TABELA 2: ARTIGOS PARA ANÁLISES POR AO DE PUBLICAÇÃO..... | 57 |
| TABELA 3: RESULTADO DO INDICADOR MPRC..... | 80 |
| TABELA 4: RESULTADO DO INDICADOR MPC | 81 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| EQUAÇÃO 1: INDICADOR DE ATIVIDADE DE MONITORAMENTO PRESCRITIVO (MPRC)..... | 74 |
| EQUAÇÃO 2: INDICADOR DE ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CONDIÇÃO (MPC)..... | 75 |

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a contextualização do tema pesquisado, sendo na sequência feita a justificativa em função da pesquisa bibliográfica e identificada a lacuna com a questão de pesquisa, declarados os objetivos, como também, uma visão geral e a estrutura do trabalho, com os temas discutidos em função do monitoramento de máquinas e equipamentos de processo industrial na Indústria 4.0

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A indústria passou por diversas transformações que revolucionaram os métodos de produção visando principalmente, aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos e serviços, sendo a 4ª Revolução Industrial, um programa com as principais inovações tecnológicas de vários segmentos aplicadas a processos de fabricação e serviços, com tecnologias habilitadoras que permitem o surgimento de novos modelos de negócio (CUFFOLILI e MUSCIO, 2018).

Para Berredjem e Benidir (2018), a manutenção baseada em condição (CBM) reage a métodos clássicos de manutenção, preservando os objetivos técnicos e econômicos da empresa, com a identificação de falha potencial de máquinas e equipamentos, buscando melhorar a disponibilidade, confiabilidade operacional. Os custos de manutenção, além de um cronograma das ações das atividades de manutenção depende fortemente dos resultados do diagnóstico. Zhang e Wang (2019), comentam que são fornecidos parâmetros e informações de suporte nos aspectos de previsão de falhas, otimizando a produção e a manutenção dentro do sistema. Um sistema de manutenção inteligente (IMS), pode fornecer indicadores de condição de diferentes variáveis para fins de monitoramento, diagnóstico, tendência e prognóstico (ANTONI e BORGHESANI, 2019).

Para Di Nardo *et al.* (2020), a manutenção preventiva baseada na condição, somente acontecerá conforme a necessidade e Coito *et al.* (2019), comentam que a iniciativa na Indústria 4.0 (I4.0), manufatura digital, fábricas inteligentes, têm tudo a ver com as mudanças organizacionais introduzidas pelas tecnologias emergentes e dispositivos capazes de interagir autonomamente uns com os outros e com as pessoas. Essas expectativas podem ser atendidas pelo Manufacturing Execution System (MES) para melhorar o desempenho, a qualidade e a agilidade dos negócios de manufatura globalizados. E para Mantravadi e Moller (2019), além disso, o modelo da I4.0 também espera melhorar a produtividade atendendo as demandas por uma resposta em tempo real por meio do controle de processo. Para Schwab (2016), as novas tecnologias estão transformando a forma de como as organizações gerenciam seus ativos, recebendo melhorias de recursos digitais.

Com interação do sistema de informação de dados na I4.0, por meio dos sensores conectados nas máquinas e equipamentos de processos industriais, podem fornecer a tomada de ação automática, mantendo o equipamento operando dentro dos padrões operacionais de processos aceitáveis, sem evolução da falha identificada pelo método de monitoramento prescritivo, com novos conceitos de atividades de monitoramento e de atividades de manutenção e seus indicadores de desempenho específicos definidos, possibilitando melhor entendimento com maior clareza e objetividade, evitando uma diversidade de terminologias citadas pelos autores Ansari, Glawar e Nemeth (2019), Erradonea, Beltrán e Arrizabalaga (2020), Bokrantz *et al.*, (2020), Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019), Aksa *et al.* (2021), entre outros

A importância de se propor um método para monitoramento prescritivo se dá devido ao fato de se suprir uma lacuna na qual as máquinas e equipamentos de processos industriais continuarão operando sem evolução da falha identificada, possibilitando a programação da atividade de manutenção preventiva de condição, ou seja, sem parar o processo totalmente prematuramente

1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Mesmo com a manutenção preditiva sendo uma condição favorável na identificação do ponto potencial de falha, tanto off-line como on-line, não toma a ação automática sobre a falha identificada. Dessa forma, existem oportunidades a serem exploradas caracterizando uma lacuna para a pesquisa, buscando a tomada de ação automática para a falha identificada e o termo manutenção prescritiva passar a ser atividade de monitoramento prescritivo, que poderá acompanhar os parâmetros das variáveis: frequência, pressão e temperatura em tempo real on-line contínuo por meio de sensores conectados nas máquinas e equipamentos rotativos e estáticos de processos industriais, mantendo o equipamento operando sem evolução da falha identificada.

Entre os trabalhos analisados, observou-se que os autores: Ansari, Glawar e Nemeth (2019), Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019), Qin *et al.* (2019), El Kihel, Gziri e Bakdid (2021), entre outros, mencionam que a manutenção preditiva e prescritiva notifica uma condição de falha para apoiar a tomada de decisão, e até poderá efetuar o desligamento de máquina, não mencionando ações realizadas pelos sensores conectados que mantém as máquinas e equipamentos operando sem evolução da falha, logo, fica confirmada uma oportunidade de pesquisa nesta direção.

1.3. QUESTÃO DE PESQUISA

Com a aplicação da atividade de monitoramento prescritivo, pode-se avançar para a realização da atividade da manutenção preventiva de condição, somente na real necessidade, portanto, a partir desse contexto é possível propor a seguinte questão de pesquisa:

“ Como proporcionar disponibilidade e confiabilidade operacional de máquinas e equipamentos dos processos industriais na I4.0 ? ”

1.4. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é propor um método para monitoramento prescritivo capaz de proporcionar disponibilidade e a confiabilidade operacional de máquinas e equipamentos de processos industriais, tais como: equipamentos rotativos e estáticos na I4.0, mantendo o equipamento operando sem evolução da falha identificada.

1.3.1 Objetivos específicos

- Definir novos conceitos de manutenção capaz de diferenciar as atividades de monitoramento e as atividades de manutenção.
- Definir novos indicadores de desempenho para as atividades de monitoramento prescritivo e para as atividades de manutenção de condição

1.5. VISÃO GERAL DA PESQUISA

A partir da questão de pesquisa e dos objetivos, apresenta-se na Figura 1 a visão geral da pesquisa, e no Capítulo 3 é apresentada e detalhada a Abordagem Metodológica da Pesquisa.

A ideia geral é apresentar como foi concebido e desenvolvido o Método para Monitoramento Prescritivo a partir da literatura, da abordagem metodológica adotada, da interação com empresas fabricantes de sensores e que desenvolvem projetos de automação e controle industrial, bem como houve uma discussão sobre a aplicabilidade englobando especialistas da área de manutenção, ligados a algumas empresas, que manifestaram interesse e confirmaram a total exequibilidade dos passos do roteiro de aplicação previsto.



Figura 1: Visão Geral da Pesquisa
Fonte: Elaborada pelo Autor

1.6. ESTRUTURA GERAL DO TRABALHO

Esta Tese está estruturada em seis capítulos, detalhados a seguir:

- Capítulo 1: Introdução contendo a Contextualização da pesquisa, Justificativa e Relevância de se abordar esta temática, Questão da Pesquisa a partir da lacuna encontrada, Objetivos geral e específicos traçados para responder à Questão de Pesquisa, apresentação de elemento gráfico para apresentar Visão Geral da Pesquisa e, por fim, a lista de capítulos com algum nível de detalhe com a Estrutura Geral do Trabalho

- Capítulo 2: Fundamentação Teórica sobre os temas que sustentam o desenvolvimento deste estudo a partir de uma revisão narrativa e uma revisão sistemática da literatura.
- Capítulo 3: Abordagem Metodológica, apresentando a classificação geral da pesquisa, detalhes da pesquisa bibliográfica, da pesquisa de campo (documental e das entrevistas) com fornecedores de sensores (6 empresas), bem como do planejamento da avaliação da aplicabilidade do método proposto por especialistas (4 empresas) da área de manutenção.
- Capítulo 4: Proposta e desenvolvimento do Método para Monitoramento Prescritivo detalhando o roteiro de aplicação, o passo-a-passo do próprio Método, bem como os novos conceitos empregados e os dois novos indicadores propostos.
- Capítulo 5: Discussão geral e apresentação da possibilidade de aplicabilidade do Método proposto para Monitoramento Prescritivo, a partir de dois exemplos ilustrativos em equipamentos estáticos e rotativos, bem como da avaliação da aplicabilidade do método proposto por especialistas.
- Capítulo 6: Conclusão e proposta para trabalhos futuros, apresentando os principais resultados alcançados, limitações e os futuros desdobramentos possíveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão apresentados: os conceitos, definições e aplicações, encontrados em trabalhos relevantes, que sustentam o desenvolvimento deste estudo, a partir de uma revisão narrativa e uma revisão sistemática da literatura, representado na Figura 2.

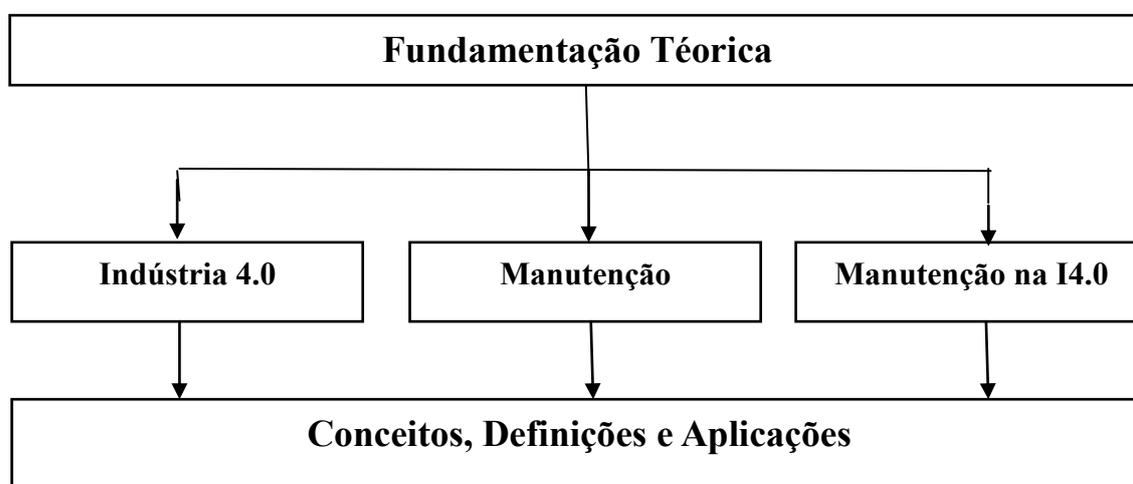


Figura 2: Fundamentação Teórica: temas abordados
Fonte: Elaborada pelo Autor

2.1. INDÚSTRIA 4.0

Oztemel e Gursev (2020,) afirmam que a 1ª revolução industrial começou no fim século XVIII, a 2ª revolução industrial aconteceu no começo do século XX, a 3ª revolução industrial ocorreu na década de 1970 e 4ª revolução industrial ou “Indústria 4.0” (I4.0), foi um esforço conjunto entre representantes de negócios, políticos e acadêmicos, promovendo a ideia de digitalização com autonomia e autogerenciamento das máquinas, como forma de aumentar o poder competitivo da indústria manufatureira alemã.

Schwab (2016), comenta que na Alemanha, há discussões sobre I4.0, para descrever como isso iria revolucionar a organização das cadeias globais de

valor. Ao permitir fábricas inteligentes, a quarta revolução industrial cria um mundo no qual os sistemas físicos e virtuais de fabricação, cooperam de forma global e flexível, permitindo total personalização de produtos e a criação de novos modelos operacionais.

Odważny *et al.* (2019), comentam que dentro deste período desde 2011, quando apareceu publicado na feira de Hannover o conceito da I4.0, vários modelos, ideias e tecnologias foram desenvolvidas, por exemplo: fábrica inteligente, sendo as tecnologias habilitadoras com maior impacto à indústria e para a sociedade: *Internet of Things* (IoT), *Internet of Services* (IoS), *cloud computing* e *cyber-physical systems* (CPS).

De acordo com Ales *et al.* (2019), o desafio da I4.0 com a questão da *Industrial Internet of Things* (IIoT) é altamente acentuada, incluindo a questão de gestão autônoma e comunicação de máquinas e equipamentos individuais dentro do processo produtivo.

Para Foresti *et al.* (2020), o objetivo da I4.0, que se baseia nos conceitos e tecnologias de sistemas físicos cibernéticos (CPS), a Internet das Coisas (IoT) e a Internet de Serviços, é reduzir a distância entre humanos e máquinas, tornando assim possível implementar facilmente estruturas para as necessidades humanas. Nos últimos anos, Tortorella *et al.* (2021), comentam que os fabricantes enfrentaram desafios significativos relacionadas a cadeias de suprimentos mais complexas, alta customização orientadas a produtos e serviços, implicando em mudanças notáveis e rápidas na fabricação com a transição da I4.0.

Schütze, Helwig e Schneider (2018), comentam que a I4.0 ou Internet das Coisas Industrial (IIoT), são dois termos para a atual revolução, visto em automação e controle industrial. Tudo está ficando mais inteligente e os dados gerados em todos os níveis do processo de produção são usados para melhorar a qualidade, flexibilidade e produtividade do produto, mas não seria possível sem sensores inteligentes, que geram os dados e permitem mais

funcionalidades de automonitoramento e autoconfiguração para condicionar o monitoramento de processos complexos na era da Indústria 4.0 (I4.0) sendo os anteriores na Indústria 1.0 (I1.0) Transdutor mecânico, na Indústria 2.0 (I2.0) Sensores elétricos, na Indústria 3.0 (I3.0) Sensores eletrônicos.

Fonseca, Amaral e Oliveira (2021), comentam que a adoção de tecnologias de informação e comunicação (TIC), apoiada por o processo de integração digital de objetos “inteligentes” (máquinas e produtos) que mesclam os mundos físico e virtual, levaram ao surgimento da chamada quarta revolução industrial, gerando recursos e capacidades que alavancam vantagens competitivas para as organizações nos negócios, melhorando a eficiência, a qualidade, enfatizando alguns benefícios, como segue:

- ✓ Integração aprimorada de processos de negócios em toda a cadeia de valor, por meio de fluxo e troca de dados, promovendo estruturas mais flexíveis.
- ✓ Maior produtividade e eficiência, melhor planejamento e previsão, custo reduzido, inovação aprimorada, flexibilidade e agilidade;
- ✓ Apoio a novos modelos de negócio que permitem novas formas de valor, por exemplo, baseada em nuvem, orientada a serviços e processos de modelos de negócios;
- ✓ Melhor personalização e experiência do cliente;
- ✓ Produtos de melhor qualidade e diagnóstico de zero defeitos;
- ✓ Análise de aprendizagem inteligente;
- ✓ Simulação e virtualização;
- ✓ Sustentabilidade ecológica, por exemplo, utilização mais eficiente de recursos e sustentabilidade social, por exemplo, trabalhadores mais apoiados para fazer o seu trabalho.

A transição para a I4.0 e a introdução de novas tecnologias digitais nas empresas industriais, estão buscando mudanças em seus sistemas de trabalho. Estima-se que as mudanças emergentes afetarão tanto o desempenho dos sistemas e o bem-estar dos humanos que trabalham e interagem com os sistemas (KADIR E BROBERG, 2020). Para Koot, Mês e Iacob (2021), a saúde e a condição resultante de sistemas de monitoramento parecem beneficiar ambientes de produção em termos de confiabilidade e qualidade. Com os recursos de percepção da Internet das Coisas (IoT) e construção sobre uma variedade de tecnologias de identificação e rastreamento que permitem o monitoramento remoto de objetos físicos sem a necessidade estar na linha de visão, são equipados com sensoriamento remoto e dispositivos de controle, o que permite coletar, processar e compartilhar dados de forma autônoma em uma infraestrutura global de objetos físicos interconectados.

Para Li *et al.* (2020), na era da I4.0, o avanço digital está remodelando os modelos de fabricação para sistemas produto-serviço (PSS) com rápidos avanços nas tecnologias digitais unindo Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), *Big Data* e a conectividade da IoT em um ritmo sem precedentes e Ramadan *et al.* (2020), comentam que a análise de *Big Data* é um dos principais pilares da I4.0, tornando-se uma ferramenta promissora para apoiar as vantagens competitivas das empresas, melhorando o desempenho baseado em dados.

Silva, Cortez, Pereira e Pilastrri (2021), comentam que nos últimos anos, vários setores da indústria estão sendo alterados por meio da adoção das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). Mais sensores digitais conectados estão sendo adicionados aos sistemas de produção, gerando *Big Data* que pode ser processado por sistemas analíticos, permitindo produzir novos *insights* e conhecimentos sobre os processos produtivos.

Tupa, Simota e Steiner (2017), compreendem I4.0 como uma proposta de conexão de todas as partes das máquinas via dados e operações integradas, possibilitando melhor gestão de sistemas, processos e ativos.

2.2. MANUTENÇÃO

Na NBR-5462 (1994), manutenção preventiva é a efetuada em intervalos pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item, significando manter as máquinas dependentes de intervalos de tempo fixo, e quando bem definidos (Rauch, Linder e Dallasega, 2020) comentam que aumentam a disponibilidade, reduzindo a manutenção corretiva.

Segundo Liang *et al.* (2018), os custos de manutenção das indústrias de manufatura tradicionais podem ser ainda mais reduzidos monitorando continuamente as condições da máquina e prevendo sua vida útil restante, e as estratégias de manutenção podem ser classificadas em duas categorias, manutenção corretiva (CM) e manutenção preventiva (PM). No CM, a manutenção é realizada após a quebra do equipamento. A PM pode ainda ser classificada em manutenção programada e manutenção baseada em condições (CBM). Na manutenção programada, a manutenção é realizada em determinados momentos em que as peças são lubrificadas, calibradas e substituídas. No CBM, as máquinas são continuamente monitoradas em tempo real para detecção de falhas. Antes que medidas apropriadas possam ser tomadas para manutenção, um diagnóstico correto do maquinário é essencial, pois manutenções desnecessárias podem diminuir a produtividade e aumentar os custos operacionais.

Para Poór, Basl e Zenisek (2019), a manutenção em uma fábrica diz respeito a cada ativo e a cada parte física ou digital, para isso existem diversos tipos de manutenções que podem ser divididas em dois grandes grupos: elementos de decisão estrutural e elementos de decisão de infraestrutura. No primeiro estão

a capacidade de manutenção, as instalações de manutenção, a tecnologia de manutenção e a integração vertical; no segundo grupo estão a organização da manutenção, a política e os conceitos de manutenção, o planejamento e o sistema de controle da manutenção, os recursos humanos, as modificações da manutenção e as medições do desempenho da manutenção por meio dos KPIs.

Para Alvarez-Alvarado e Jayaweera (2020), plano de manutenção preventiva de geradores é essencial para garantir a disponibilidade de fornecimento de energia elétrica em um sistema de potência. Existem vários tipos de planos preventivos dos quais a manutenção preventiva periódica (PPM) e a manutenção centrada na confiabilidade (RCM) são mais populares na indústria de sistemas de energia. No entanto, estes planos não consideram os fatores operacionais e os esforços de manutenção ideais que poderiam maximizar o benefício.

Para Fuzi Ismail (2019) a caldeira de vapor que é um equipamento estático, é um componente integral em usinas termelétricas que requerem programação de manutenção eficaz para prolongar o ciclo de vida geral da caldeira. No entanto, as caldeiras são comumente afetadas por problemas como desligamento e vazamento no tubo. Especialistas do setor adotaram a manutenção preventiva para superar a repetição de interrupções. Este método é falho no aspecto de atividades de manutenção redundantes, levando à redução da produtividade do trabalho e aumento dos custos operacionais de manutenção.

A otimização da manutenção é benéfica na construção de um programa de manutenção competente para determinar a confiabilidade da planta com base na segurança e no custo e ainda Fuzi e Ismail (2019), comentam que a análise destaca a revisão da caldeira como a mais preferível devido à sua alta classificação em duração operacional e custo de manutenção.

Para Moens *et al.* (2020), os *Key Performance Indicators* (KPIs) mais comuns para esta categoria de máquinas (motores, bombas, ventiladores, turbinas, caixas de engrenagens, rolamentos) são vibrações e sinais térmicos. O monitoramento desses KPIs leva à detecção precoce de falhas, o que é crucial para passar de uma abordagem baseada em tempo, Programa de Manutenção Preventiva (PM) para uma estratégia de Manutenção Preditiva (PdM) baseada em condições, que reduz o tempo de inatividade inesperado da máquina e a substituição desnecessária de peças de máquinas e os custos associados. Através da aplicação do paradigma IIoT e sensores inteligentes, a condição dessas máquinas pode ser constantemente monitorada e avaliada.

Para Berredjem e Benidir (2018), a manutenção baseada em condição (CBM) reage a métodos clássicos de manutenção, preservando os objetivos técnicos e econômicos da empresa, com a identificação de falha potencial de máquinas e equipamentos, buscando melhorar a disponibilidade, confiabilidade operacional. Os custos de manutenção, além de o cronograma das ações das atividades de manutenção dependerem fortemente dos resultados do diagnóstico. Zhang e Wang (2019), comentam que são fornecidos parâmetros e informações de suporte nos aspectos de previsão de falhas, otimizando a produção e a manutenção dentro do sistema.

Segundo Ma *et al.* (2019), desde a década de 1970, diagnóstico de falhas, previsão de falhas, a manutenção baseada em condição (MBC) e o gerenciamento de saúde, vêm sendo gradativamente aplicados na engenharia. Esses métodos reduzem o efeito de dano ou falha de máquinas rotativas proporcionando confiabilidade e segurança de todo o sistema mecânico, reduzindo perdas econômicas.

Para Wang *et al.* (2020), a maior precisão para prever a vida útil restante de equipamento resulta na identificação preditiva dos recursos de falha, implementação proativa da manutenção preventiva e redução dos custos de manutenção e recursos dos provedores de sistema produto-serviço (*product-service system* - PSS). A manutenção programada adequadamente influencia

diretamente na vida útil de equipamentos e sua produtividade, especialmente para equipamentos complexos trabalhando em vários ambientes em condições adversas, mas com coleta e análise de dados operacionais relevantes, a confiabilidade do equipamento para todo o sistema PSS pode ser melhorado.

Para Vlasov *et al.* (2018), sistemas de Manutenção preditiva também são chamados de sistemas de diagnóstico intelectual e análise preditiva, está relacionado ao fato de que em tais sistemas as soluções baseadas no intelecto artificial são amplamente utilizadas, com os vários métodos modernos de desenvolvimento de sistemas de manutenção preditiva como segue:

- ✓ O método baseado no modelo autorregressivo, que usa o aparato matemático de análise e previsão das séries temporais estacionárias na criação de estatísticas matemáticas, é possível construir a previsão de uma ou outra característica, cujas estatísticas foram transmitidas ao sistema;
- ✓ O método baseado na análise multivariada, usando análise de dados multidimensionais, permitindo formar várias variantes do desenvolvimento posterior, para obter uma previsão altamente precisa da condição adicional do equipamento;
- ✓ O método baseado na aprendizagem assistida por computador, permitindo revelar as falhas e avaliar o futuro vida útil dependendo dos dados estatísticos.

Ainda se nota que o termo continua sendo chamado como manutenção preditiva, que claramente apresenta que está sendo realizado um monitoramento de máquinas e equipamentos.

Para El Kihel, Gziri e Bakdid (2021), a crescente demanda por disponibilidade, confiabilidade operacional, manutenibilidade e segurança de sistemas estão se tornando menos eficientes e obsoletos por estratégias tradicionais de manutenção, por isso a manutenção preditiva "PdM" é a nova geração de

manutenção, tem sido adotado por diversos setores, em particular aqueles em que disponibilidade, confiabilidade operacional, manutenibilidade, segurança, eficiência e qualidade, bem como a proteção do ambiente são de suma importância. Manutenção Preditiva consiste principalmente em prever falhas do sistema, para tornar o trabalho de manutenção mais proativo, como resultado, a previsão de manutenção, pode-se aumentar a disponibilidade de máquinas e equipamentos, aumentar os lucros e reduzir o custo de estoque de peças de reposição, o que leva a um menor custo de manutenção.

Marichal *et al.* (2020), comentam que avanços relevantes na manutenção preditiva foram desenvolvidos, uma vez que foi demonstrado que é o método mais adequado e eficiente. Na indústria marítima é especialmente útil ao fato de que, qualquer falha inesperada durante uma viagem pode fazer um perigo. Uma das previsões mais interessantes na manutenção preditiva é baseada nos dados de análise de vibração, que são os ensaios não destrutivos que fornecem a maior quantidade de informações sobre funcionamento de uma máquina. Dessa forma, as vibrações são indicadores de um problema potencial. A manutenção da maioria das máquinas a bordo baseia-se no número de horas, particularmente, os sistemas separadores são revisados quando atingirem 12.000 horas de operação. Este tipo de manutenção não é eficiente, pois muitas vezes é possível manter o dispositivo funcionando desde que não apresente sinais de falha.

Para Aransyah, Rosa e Colombo (2020), os gerentes de manutenção em qualquer empresa industrial buscam maximizar o tempo de atividade dos ativos de produção e manter o tempo de inatividade no mínimo. Esses fatores afetam a capacidade de uma indústria de cumprir o prazo de produção e, ao mesmo tempo, garantir o produto de boa qualidade a um custo mínimo de produção. Para isso são necessários métodos de manutenção eficazes e ferramentas inovadoras. A crescente complexidade das tecnologias de fabricação atuais, exigirá o aumento de pessoal competente e treinado para resolver rapidamente as interrupções que ocorrem no chão de fábrica, o que requer maior

conhecimento técnico sobre como mantê-lo e repará-lo em caso de falha do sistema.

Para Ansari, Glawar e Nemeth (2019), o termo *Knowledge-Based Maintenance* (KBM), Manutenção Baseada no Conhecimento, tem sido discutido na literatura de manutenção e gestão de ativos com objetivo principal de ter vantagens competitivas para redução de custos de manutenção, e são dados de processos coletados de máquinas transmitidos para três áreas que fornecem estratégias globais de manutenção que são:

- a) Manutenção baseada no risco;
- b) Manutenção baseada na condição ou no tempo;
- c) Manutenção produtiva total (TPM) e manutenção enxuta.

Pelantova e Cecak (2018), comentam que a garantia da continuidade e da qualidade da produção leva parte das organizações a pensar no status da manutenção de seus equipamentos e devem apresentar novas orientações de gerenciamento de manutenção.

Alcayaga, Wiener e Hansen (2019), comentam que as práticas de manutenção envolvem três abordagens principais: uma abordagem corretiva ou reativa envolve reparos e manutenção é iniciado apenas após os produtos terem falhado, a manutenção preventiva que é a planejada em avançar para evitar falhas de acordo com um tempo fixo ou operação intervalo, independente da condição do produto e a manutenção proativa atualiza o processo de *design* para prevenir ou reduzir falhas futuras determinando as causas raiz de falha do produto atual.

Para Meissner, Rahn e Wicke (2021), e para Errandonea, Beltrán e Arrizabalaga (2020), a evolução das estratégias individuais de manutenção geram benefícios e vem com o custo de um nível cada vez maior de complexidade.

Para Magadán *et al.* (2020), a manutenção preditiva de equipamentos industriais tornou-se um aspecto crítico na I4.0. os autores implementaram um teste de um sistema de Internet industrial das coisas (IIoT) projetado para monitorar motores elétricos em tempo real, para a detecção de anomalias de vibrações e a temperatura, porém, como análise preditiva indicando tendências.

Para Di Nardo *et al.* (2020), as operações de manutenção são planejadas com base nas condições operacionais reais, pelos dados adquiridos em tempo real e as tendências relacionadas e analisadas, e com as mudanças da I4.0 terão impactos na organização, arquitetura e no ambiente de produção da empresa.

2.3. MANUTENÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0

Para Nemeth *et al.* (2018), a transformação digital tem um forte impacto nas técnicas e processos de fabricação e requer uma nova manutenção baseada em dados, apoiando tomada de decisão, garantindo a disponibilidade da máquina e a estabilidade do processo. Nesse sentido, Shin e Jun (2015). comentam que com o avanço da tecnologia de informação e comunicação (TIC), consegue-se a visibilidade do status de componente durante o seu período de uso. A manutenção baseada em condição (CBM) faz o diagnóstico do status com base em dados de monitoramento, prevê anormalidades possibilitando ações de atividades de manutenção adequadas, e para Hawkrige *et al.* (2021), essa transformação pode fornecer vantagem competitiva para muitos fabricantes, mas empresas menores podem não aproveitar esta oportunidade por falta de recursos.

Com a chegada da I4.0 Poór, Basl e Zenisek (2019), comentam que introduz e desenvolve muitos métodos diferentes para fazer manutenção, sendo os custos de manutenção considerados criadores de valor. Ao contrário, os empresários, no passado, os consideravam como um custo que deveria ser reduzido porque a tendência era consertar a máquina ou o equipamento

apenas quando parava, mas deforma simples a relação entre ativos físicos e ativos digitais. É totalmente baseado na eficiência e exige que cada um dos ativos de cada máquina funcione da melhor maneira possível. Esta é a razão por que muitas empresas, que introduziram a I4.0, precisam desenvolver uma estratégia de manutenção que garanta um alto nível de eficiência e uma baixa chance de falha ou quebra. Assim, esta empresa inovadora começou a adaptar a máquina, os funcionários e as fábricas e posteriormente começou a desenvolver uma estratégia de manutenção.

Alvarez-Alvarado e Jayaweera (2020), propuseram um modelo inovador, a *Smart Maintenance* (SM), manutenção inteligente que leva a um plano de manutenção eficaz, mostrando a necessidade de avançar nas novas tecnologias para melhores resultados com um melhor desempenho do sistema. O conceito de manutenção atingiu um novo paradigma de manutenção inteligente (SM).

Valamede e Akkari (2020), comentam que a interconectividade, possibilita o planejamento e a manutenção, com dados das condições reais de cada equipamento e para Vlasov *et al.* (2018), as tecnologias de monitoramento de condição fornece uma redução do tempo de inatividade e redução nos custos do equipamento. Um sistema de manutenção inteligente (IMS) pode fornecer indicadores de condição de diferentes variáveis para fins de monitoramento, diagnóstico, tendência e prognóstico (ANTONI E BORGHESANI, 2019).

Daniyan *et al.* (2020), comentam que com a prática da manutenção prescritiva facilitará a manutenção. O controle e monitoramento de sistemas complexos de produção aumentarão, e por esta razão, sistema sensorial irá desempenhar um papel importante na aquisição de dados (RUACH, LINDER E DALLASRGA, 2020). Segundo Bokrantz *et al.* (2020), com a introdução de tecnologias digitais em sistemas de produção, será possível avançar na compreensão do que faz certas práticas eficazes.

Fox *et al.* (2022), comentam que os parques eólicos *offshore* são uma fonte em rápido desenvolvimento de energia limpa e de baixo carbono e à medida que continuam a crescer em escala e capacidade, também aumenta a exigência de sua eficiência, operação e manutenção otimizadas. Historicamente, as abordagens de manutenção têm sido puramente reativas, porém, existe um movimento na energia eólica *offshore* e na indústria em geral em direção abordagens de manutenção mais proativas e baseadas em condições que dependem de dados operacionais orientados, tomando uma decisão a manutenção prescritiva, sendo uma evolução da preditiva que usam dados operacionais para determinar se um componente da turbina falhará para fornecer aviso suficiente para fazer a manutenção necessária.

Para Ansari, Glawar e Nemeth (2019), os sistemas de produção físico cibernéticos (CPPS – Cyber physical production systems) como uma tecnologia emergente da I4.0, acionam um paradigma de mudança, da manutenção descritiva para a manutenção preditiva, levando à evolução e transformação de estratégias e modelos de manutenção baseada em conhecimento (KBM) de diagnóstico para a manutenção prescritiva, que é responsável pela consideração unificada de resultados coletados e é categorizado em quatro instâncias, dependendo da maturidade e complexidade de suas capacidades funcionais, conforme Quadro 1.

Quadro 1: Categorização da Manutenção

| Categoria | Manutenção | Complexidade | Maturidade | O que responder |
|------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------|
| Tipo I | Descritiva | Baixa | Baixa | O que aconteceu? |
| Tipo II | Diagnóstico | Médio | Baixa | Por que isso aconteceu? |
| Tipo III | Preditiva | Alta | Média | O que vai acontecer e quando? |
| Tipo IV | Prescritiva | Alta | Alta | Como deveria acontecer? |

Fonte: Traduzido de Ansari, Glawar e Nemeth (2019).

Observa-se no Quadro 1, que o nível de conhecimento necessário aumenta muito na categoria Tipo IV, ao mesmo tempo que aumenta o nível de complexidade. Para Bustos *et al.* (2021), a transição para a I4.0, desencadeia uma mudança de paradigma de manutenção descritiva para preditiva e

prescritiva, conhecido como o mais alto nível de maturidade de manutenção baseado no conhecimento (KBM) e ainda comentam que profissionais de manutenção e pesquisadores usam termos diferentes para descrever os quatro níveis de maturidade do KBM, que em alguns casos permanecem vagos ou ambíguos, tendo duas ou mais interpretações como os conceitos da manutenção inteligente e manutenção 4.0.

Para Werbińska-Wojciechowska e Winiarska (2023) a alta complexidade, automação e flexibilidade da chamada fábrica inteligente, trazem novos desafios em termos de confiabilidade e segurança, com troca de dados entre máquinas ou a troca de dados sobre produção e operação destinando-se a otimizar custos, melhorar a disponibilidade e confiabilidade, ou garantir um nível adequado de Overall Equipment Effectiveness (OEE), Eficiência Global do Equipamento.

Para Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019), manutenção 4.0 pode quebrar as compensações das estratégias mais antigas, permitindo aumento de vida útil dos equipamentos de produção e comentam que na visão da manutenção o desenvolvimento de novas tecnologias e os requisitos do usuário final, afetaram as operações de manutenção de máquinas e equipamentos e a forma de planejar e implementar as atividades de manutenção, e acaba sendo usado o termo de máquina inteligente (*Smart Machine*), implicando em uma máquina melhor conectada, mais flexível, mais eficiente e segura e com três componentes principais: Físico, Inteligente e Conectividade. Os componentes Inteligentes são conectados diretamente com serviços Físicos, e a Conectividade permite a troca de informações entre a máquina e o ambiente, e a Inteligência e a Conectividade possibilitam um conjunto de funções e capacidade de máquinas, conforme apresenta o Quadro 2. Ainda os autores comentam de informações, análise e ação em fases cronológicas da análise de manutenção, apresentadas na Figura 3.

Observa-se no Quadro 2, que as funções são importantes trabalhando juntas e não isoladas e Shang *et al.* (2018), comentam que falsos alarmes podem ser

resolvido por uma alternativa de método de monitoramento e diagnóstico de processo baseado em análise de falhas.

Quadro 2: Função e Capacidade da Máquina

| Função | Capacidade |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Monitoramento | As máquinas permitem o monitoramento de uma auto condição, operação e ambiente externo através de sensores e fontes de dados externo e pode alertar o usuário ou outras partes interessadas a mudanças nas circunstâncias ou atuação. |
| Controle | As máquinas podem ser controladas remotamente com comandos ou algoritmos embutidos no dispositivo ou residir na nuvem da máquina. |
| Otimização | Máquinas inteligentes e conectadas podem ser aplicados algoritmos e análises em uso ou dados históricos para melhorar a produção, utilização e eficiência. |
| Autonomia | As funções se combinam para permitir que máquinas inteligentes e conectadas alcancem um nível de autonomia antes inatingível. O nível mais simples faz operação usando sensores e software em tempo real, e o mais sofisticado são capazes de aprender sobre seus ambientes, autodiagnosticar suas próprias necessidades de serviço e adaptar as necessidades dos usuários. A autonomia pode reduzir a necessidade de operador e melhorar a segurança em ambientes perigosos e facilitar a operação em locais remotos. |

Fonte: Traduzido de Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019).

Para Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019), os sensores traduzem ações físicas de máquinas em sinais digitais, que comunicam variáveis como temperatura, vibração ou condutividade, não sendo suficiente uma simples coleta de dados, requerendo uma infraestrutura de IoT e permitindo a coleta e distribuição de dados do sensor, melhorando as maneiras de como as máquinas e os equipamentos são gerenciados, conforme segue:

- a) Maior adoção da Manutenção Preditiva. O principal motivo para aplicar a IoT para gerenciar ativos é a manutenção preditiva. As técnicas preditivas monitoram o equipamento quanto a falhas pendentes e notificam a equipe de manutenção quando a substituição de uma peça é necessária. Sensores embutidos em equipamentos verificam condições anormais e acionam ordens de serviço quando os limites operacionais seguros são violados;
- b) Análise de dados em tempo real. A IoT leva o *Machine-to-Machine* (tecnologias que permitem que as máquinas se comuniquem) para o

próximo nível, incluindo um terceiro elemento: dados. A disponibilidade de todos os dados da máquina em uma rede virtual oferece aos fabricantes de equipamentos originais a capacidade de agregar e analisar os dados para gerar melhores modelos analíticos preditivos;

- c) Indicadores de desempenho precisos. Disponibilidade, confiabilidade e outros indicadores importantes de desempenho, como tempo médio entre falhas (MTBF) e tempo médio de reparo (MTTR), podem ser calculadas automaticamente pelo sistema e fornecidas aos painéis de relatórios. Isso remove o elemento humano na captura de todo o tempo de inatividade, garantindo que os dados sejam os mais precisos possíveis;
- d) Ativos remotos. Os ativos conectados gerando suas próprias ordens de serviço no *Computerized maintenance management system* (CMMS) com uma lista proposta de itens de ação e uma lista recomendada de sobressalentes para concluir o trabalho reduzirão o tempo médio de reparo;
- e) Ações de reparo recomendadas. Os dados completos sobre falhas podem ser coletados, segregados e executados em tempo real usando a tecnologia de nuvem. As opções de reparo podem ser indicadas automaticamente pelo sistema e as ações podem ser recomendadas ao técnico. Todos os dados de possíveis falhas serão usados para direcionar o reparo, incluindo condições de operação do sistema no momento da falha, dados de reparos anteriores do CMMS, padrões de desgaste e dados de operação do equipamento. Com efeito, os técnicos poderão realizar o seu trabalho de forma mais eficiente.

Observa-se na Figura 3, que a ação para análise de manutenção preditiva e prescritiva será determinada por análise *off-line*, ou seja, por um profissional externo (inspetor), não sendo tomada de decisão automatizada

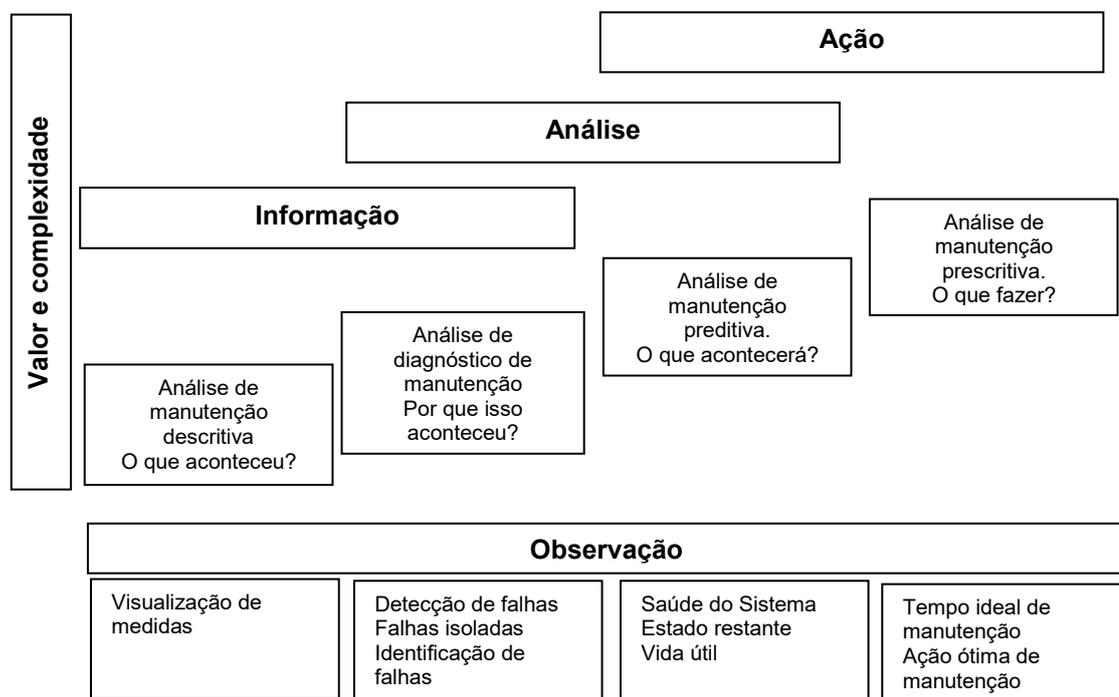


Figura 3: Fases cronológicas da análise de manutenção
 Fonte: Traduzido de Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019).

Para Errandonea, Beltrán e Arrizabalaga (2020), as diferentes estratégias de manutenção que podem ser seguidas ao tomar decisão sobre quando e qual manutenção precisa ser realizada, será detalhada a seguir:

- ✓ **Manutenção preditiva:** Manutenção prognostica consiste em utilizar toda informação que compõe e envolve um sistema e pode prever a sua vida restante por análise de tendência, sendo um dos tópicos mais intensamente investigados no atual movimento da I4.0.
- ✓ **Manutenção prescritiva:** É a manutenção baseada em conhecimento, otimizar a manutenção com bases em previsões, análise de dados históricos e em tempo real para prever o status do ativo requerido e se compromete a prescrever um plano de ação com advento da Indústria 4.0.

Ainda Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019), comentam que a aplicação de análise de *Big Data* de manutenção representa o quarto nível de maturidade

em manutenção preditiva, sendo mencionado pelos autores como manutenção 4.0, apresentado na Figura 4.

Ainda para Errandonea, Beltrán e Arrizabalaga (2020), as estratégias de manutenção preditiva e prescritiva podem ter grandes vantagens, como:

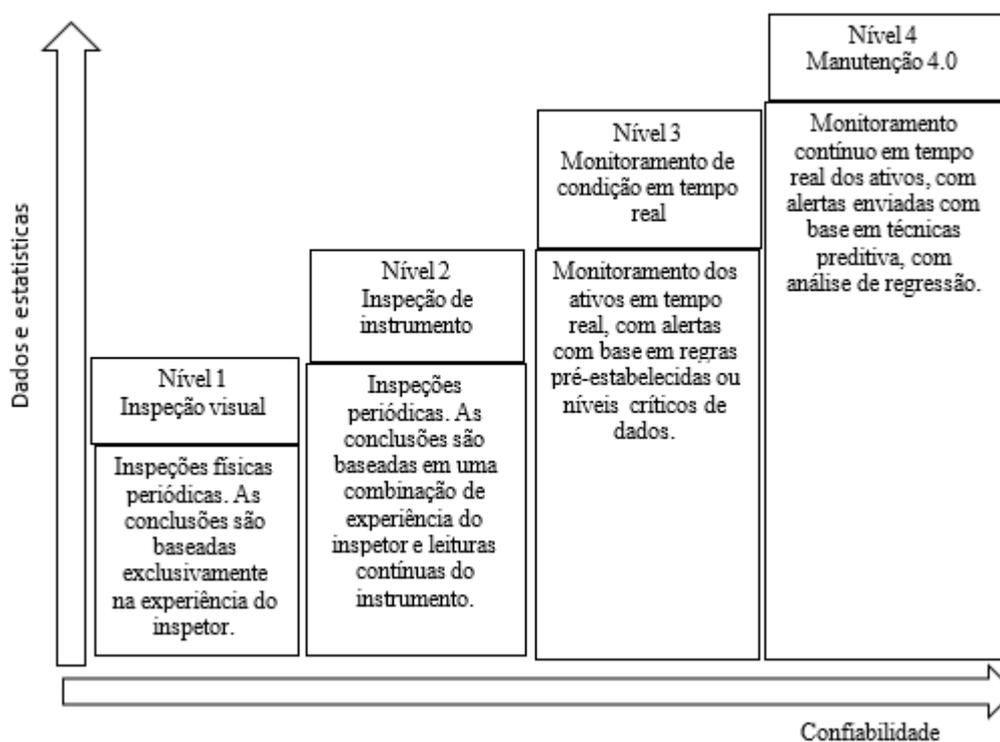
- ✓ Redução do tempo de inatividade da produção;
- ✓ Redução de avarias;
- ✓ Redução de custos;
- ✓ Melhor produtividade;
- ✓ Eliminar a incerteza nas tarefas de manutenção;
- ✓ Aumento da vida útil do equipamento;
- ✓ Melhor atendimento ao cliente e reputação da organização;
- ✓ Redução de desperdício de energia;
- ✓ Melhor segurança da instalação.

Para Bukhsh *et al.* (2019), muitos estudos da literatura propuseram empregar as técnicas de aprendizado de máquina para estimar o estado de desempenho de um ativo, utilizando coletas de dados para registrar o comprometimento dos ativos, uma estratégia para a tomada de decisão de realizar a manutenção baseada em condição.

Observa-se na Figura 4, que a confiabilidade aumenta no nível 4, porém, a necessidade de conhecimento é alta no conteúdo, processo e TI.

A dificuldade para Bokrantz *et al.* (2020), é de responder como as operações de manutenção modernizadas, chamadas de manutenção inteligente podem afetar o desempenho industrial, devido a rápida transição com as tecnologias digitais difundidas no ambiente fabril, mas quando existe o interesse em saber como vai a mudança da manutenção no ambiente industrial altamente conectado, tanto na pesquisa como na prática, cresce o número de conceitos, aumentando a preocupação como a falta de clareza e objetividade, como: e-Manutenção, Prognóstico e “gestão da saúde”, Manutenção preditiva,

Manutenção 4.0, Manutenção inteligente, apresentando seus conceitos, definições e atributos no Quadro 3, e o termo mais utilizado por profissionais nas empresas Suecas e em outras empresas Europeias é o termo manutenção inteligente.



| Dados | Nível 1 Inspeção visual | Nível 2 Inspeção de instrumento | Nível 3 Monitoramento de condição em tempo real | Nível 4 Manutenção 4.0 |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conteúdo Que tipos de dados usar | -Insp. Period. Física -Lista verificação -Registro em papel | -Insp. Periód. Física -Instrumentos -Gravação digital | -Insp. remota contínua -Sensor -Gravação digital | -Insp. remota contínua -Sensor e outro dados -Gravação digital |
| Processo Como serão usados esses dados | -Dados de condição baseado em papel -Vários pontos de inspeção | -Dados de condição digital -Únicos pontos de inspeção | -Dados de condição digital -Vários pontos de inspeção | -Dados de condição digital -Vários pontos de inspeção -Dados de ambiente digital -Histórico de manutenção digital |
| TI Quais ferramentas de hardware e software serão usadas | -MS Excel -MS Access | -Software de instrumento embutido | -Software de monitoramento de condição -Banco de dados de condição | -Software de monitoramento de condição -Plataforma de <i>Big Data</i> -Rede Wi-Fi -Software estatístico |

Figura 4: Matriz de maturidade em manutenção preditiva
Fonte: Traduzido de Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019).

Para Bokrantz *et al.* (2020), o conceito de manutenção inteligente é definido como “um projeto organizacional para gerenciar a manutenção de plantas fabris em ambientes com tecnologias digitais difundidas”. Uma solução multidimensional constituindo quatro dimensões da tomada de decisão baseada em dados, como uma estrutura do conceito:

- ✓ Tomada de decisão: Automação de decisão ou aumento da decisão;
- ✓ Recursos de capital humano: Conhecimento ou atitude ou habilidade ou outras características;
- ✓ Integração interna: Fluxo interno ou colaboração ou sincronização;
- ✓ Integração externa: Fluxo externo ou parcerias estratégicas ou redes de trabalho.

Observe-se, que essa estrutura como o conceito da manutenção inteligente deve ter uma atenção para os recursos de capital humano, com a habilidade de tecnologia de conhecimento e esse conceito é uma transição para novas tecnologias, sendo evidente o investimento de capital em tecnologia da informação e comunicação (TIC).

Observa-se no Quadro 3, que os conceitos estão muito próximos um do outro, apresentando falta de clareza e objetividade.

São apresentados cinco conceitos, suas respectivas definições e seus atributos.

Quadro 3: Conceitos, definições e atributos

| Conceitos | Definições | Atributos |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| e-Manutenção | <p>-Monitoramento, coleta, registro, e distribuição de dados de integridade do sistema em tempo real, dados gerados para manutenção, bem como outras decisões e informações de suporte de desempenho para diferentes partes interessadas, independente da organização ou localização geográfica.</p> <p>-Aproveitando informações e tecnologia da internet, o e-Diagnostico/sistema de manutenção fornece aos especialistas do fornecedor de equipamentos a capacidade de se conectar remotamente aos equipamentos da fábrica,</p> | Diagnóstico, prognóstico, monitoramento, manutenção baseada em condição, tomada de decisão, integração estratégica de manutenção e tecnologia da informação e comunicação (TIC) remoto. |
| Prognóstico e “gestão da saúde” | <p>-Tecnologia e métodos para avaliar a confiabilidade de um produto em suas condições reais de ciclo de vida para determinar o advento de falhas e utilizar o risco do sistema.</p> <p>-Aglomerado de estratégias e técnicas que promovem monitoramento de condições, diagnósticos, prognósticos e manutenção de um produto, máquina ou processo.</p> | Diagnósticos, prognósticos, manutenção baseada em condições, avaliação da saúde, estimativa de vida útil restante. |
| Manutenção preditiva | <p>-Parâmetros físicos selecionados e associados a uma máquina em operação são detectados, medidos e gravado de forma intermitente ou contínua com objetivo de reduzir, analisar comparar os dados e informações obtidas para decisões de suporte relacionada a operação e manutenção de máquina.</p> <p>-Capacidade de traduzir dados brutos em informações acionáveis para facilitar a tomada de decisões de manutenção.</p> | Diagnósticos, prognósticos, manutenção baseada em condições, programa de manutenção, tomada de decisão. |
| Manutenção 4.0 | <p>-Análise preditiva e sugere solução viável com grande aplicação da I4.0, especialmente no aspecto de manutenção que tratam da coleta de dados, sua análise e visualização de ativos para tomada de decisão.</p> <p>-Utilização do avanço tecnológico para análise preditiva fornecendo decisões baseadas na viabilidade.</p> | Diagnósticos, prognósticos, análise de <i>Big Data</i> , programação de manutenção, tomada de decisão. |
| Manutenção inteligente | <p>-Uma ferramenta de manutenção inteligente que fornece quando possível uma visibilidade completa do estado de saúde do ativo., evitando a necessidade de intervenção de manutenção dos operadores das imediações do ativo.</p> <p>-Os serviços de manutenção inteligente em campo com inteligência fornecida pela tecnologia embutida em um produto/equipamento ou facilitado pelo uso de dispositivos, sensores ou qualquer outra ferramenta baseada em tecnologia.</p> | Diagnósticos, prognósticos, análise de <i>Big Data</i> , Autocapacidade, monitoramento, controle remoto. |

Fonte: Traduzido de Bokrantz *et al.* (2020).

Para Foresti *et al.* (2020), a implementação da inteligência artificial (IA) em uma sociedade inteligente, na qual a análise dos hábitos humanos é obrigatório, requer análise de dados automatizados usando aplicativos inteligentes, uma infraestrutura, sistemas e uma rede inteligente, se tornando cada vez mais necessária para melhorar a vantagem competitiva das empresas, mas muitas empresas não estão preparadas para essa nova era digital, especialmente em termos de informações em sistemas de tecnologia (TI) para linhas de produção em consideração aos hábitos humanos e o respectivo conhecimento, será necessário uma avaliação da relação entre novas máquinas/componentes e Recursos Humanos, com objetivo da melhoria da proatividade da manutenção, tornando possível detectar quaisquer falhas diretas ou indiretas antes que ocorram.

A tecnologia de previsão de falhas é chave para sistemas mecânicos. Os métodos tradicionais de inteligência artificial são com base em dados de recursos, mas a extração de recursos de dados de falha deve ser projetada artificialmente com base nas características de falhas diferentes em vez de extração automática. Ao mesmo tempo, o desempenho de um modelo ou algoritmo é diretamente determinado pela qualidade do recurso e informação dos dados a serem monitorados (MA *et al.*, 2019).

Jasiulewicz-Kaczmarek, Legutko e Kluk (2020), comentam que em geral, a I4.0 pode ser definido como um termo que descreve coletivamente mudanças no escopo tecnológico e na organização das cadeias de valores e o uso de modernas abordagens de manutenção, como Manutenção 4.0 (também chamado de Manutenção Inteligente) é destacado como uma manufatura inteligente, que nos últimos anos, devido à evolução da tecnologia, as máquinas tornaram-se cada vez mais complexas e mais críticos em termos de confiabilidade e disponibilidade.

Com o tempo, a manutenção evoluiu de Manutenção reativa 1.0 (M1.0) para Manutenção preventiva 2.0 (M2.0) e depois para Manutenção baseada em condição 3.0 (M3.0), para atual abordagem preditiva e prescritiva que

geralmente é denotado como Manutenção 4.0 (M4.0), sendo um conjunto de técnicas para monitorar a condição atual das máquinas com o objetivo de prever a falha da máquina usando automação de análise em tempo real com supervisão ou não supervisão de aprendizado de máquina e para prescrever o melhor curso de ação em tempo real, análise de possíveis decisões e interação entre eles definidos como:

- ✓ Subconjunto do sistema de manufatura inteligente, representado por autoaprendizagem e máquinas inteligentes que prevê falhas, faz diagnósticos e dispara ações de manutenção;
- ✓ Aplicação de aprendizado de máquina, automação processos e robótica/drones para confiabilidade de manutenção';
- ✓ Prever falhas futuras em ativos e, finalmente prescrever a prevenção mais eficaz, aplicando técnicas analíticas avançadas em *big data* sobre condição técnica, uso, ambiente, histórico de manutenção, equipamentos similares em outro lugar, e de fato, qualquer coisa possivelmente relacionada ao desempenho de um ativo.

E ainda o aprendizado de máquina para Turner *et al.* (2019), terá um papel significativo a desempenhar na entrega de sistemas de tomada de decisão de manutenção automatizados e com suporte inteligente. Além da preocupação pela incorporação de requisitos da manutenção 4.0, Kandemir *et al.* (2019), comentam que no ambiente operacional do navio para realizar as análises, mostra a necessidade de evitar o erro humano de tarefas de operação de manutenção em relação às condições de operação do navio, sendo necessário o conhecimento

As atividades de manutenção para Valamede e Akkari (2020), são consideradas essenciais para garantir o bom funcionamento de máquinas e equipamentos e, conseqüentemente, de toda a linha de produção. A importância dessas atividades se destaca nas fábricas inteligentes, uma vez que a complexidade técnica e a quantidade de artefatos inteligentes são maiores. Os mesmos autores também discutem sobre o planejamento da manutenção, prática baseada no histórico de falhas das máquinas, que utiliza a

análise preditiva, para correlacionar os parâmetros de fluxo das condições com as probabilidades de erro dos equipamentos. Com base em dados do *Big Data*, essa análise utiliza algoritmos complexos para prever defeitos, o que pode aumentar a precisão da expectativa de vida desses instrumentos. O desenvolvimento da tecnologia de inteligência artificial está trazendo novas oportunidades na construção.

Xu *et al.* (2021), comentam que o aprendizado de máquina é uma grande área de interesse dentro do campo da inteligência artificial, desempenhando um papel fundamental e importante no processo de tornar a construção “inteligente”. A aplicação do aprendizado de máquina na construção tem o potencial para abrir uma série de oportunidades. como supervisão do local, detecção automática e manutenção inteligente.

Para Poór, Basl e Zenisek (2019), na era da I4.0 os gerentes de manutenção, precisam de habilidades técnicas adicionais e devem ser capazes de gerenciar os processos de manutenção, governar o impacto que a manutenção tem nos outros setores, nas metas de negócios, na qualidade, na eficiência e na segurança com a manutenção 4.0 como um serviço. A missão e posição da manutenção em uma moderna fábrica gerenciada no contexto da I4.0 é destacada pelo fato de que a manutenção é um dos principais processos que afetam a produtividade da produção, e Fusko *et al.* (2018), comentam que num futuro próximo, tudo o que for possível digitalizar será digitalizado e tudo o que puder ser colocado em rede será colocado. A digitalização é o elemento chave para o sucesso e futuro das fábricas. O software está se tornando cada vez mais um fator de produção decisivo, porque todas essas máquinas em rede devem ser controladas e todos os dados digitais devem ser armazenados, processados e analisados de forma significativa, sendo a manutenção cada vez mais percebidas como uma chave para o sucesso econômico das empresas de manufatura.

Os recursos lineares têm propriedades lineares, por exemplo, geometria e características subjacentes semelhantes, à distância. Eles mostram padrões específicos de contínuas deteriorações e falhas inerentes. Portanto, as ações

de inspeção corretiva e manutenção serão semelhantes ao longo de um ativo linear, mas como o ativo está distribuído em uma grande área, os custos de execução são maiores, com o uso de tecnologia de inspeção e manutenção inteligente como: Robôs autônomos, veículos aéreos não tripulados, medidores de inspeção de tubos e veículos operados remotamente, em diferentes ambientes industriais de maneira que melhore as condições operacionais destes ativos (SENEVIRANTNE *et al.*, 2018).

Para os Qin *et al.* (2019), com a crescente escala e complexidade da Internet das Coisas (IoT), o monitoramento de segurança está se tornando cada vez mais difícil. Essa preocupação mostra necessidade da segurança na conectividade dos dispositivos (sensores) conectados nas máquinas e equipamentos para proporcionar a confiabilidade operacional do sistema.

A estratégia de manutenção ideal para Liu *et al.* (2019), é alcançada minimizando a taxa de custo de longo prazo em termos do ciclo de reparação e a manutenção baseada em condições e as decisões são fornecidas com base na condição de integridade do sistema, ganhando popularidade nos últimos anos como manutenção prescritiva, estendendo o conceito de previsão de falha, por prever medidas de manutenção e prescrever um curso de ações com base nos dados históricos e recebidos em tempo real e suas estratégias são atualizadas com base nos parâmetros de degradação observados/previstos e no estado do sistema.

Os prognósticos, desempenham um papel cada vez mais importante nos sistemas de engenharia moderna para tomada de decisão de manutenção inteligente, comentam Wen *et al.* (2018), se referindo ao processo de avaliação da saúde atual de um sistema ou um subcomponente e, em seguida, prever a *remaining useful life* (RUL), vida útil restante com base na atual condição de saúde de máquinas e equipamentos, e ainda comentam que, *Intelligent maintenance systems* (IMS), Sistemas de manutenção inteligente são projetados para fornecer ferramentas de apoio à decisão para otimizar as operações de manutenção, identificar estratégias de manutenção confiáveis e econômicas para garantir uma produção consistente com tempo de inatividade

não planejado minimizado e executando apenas ações quando necessário, proporcionando maior disponibilidade e confiabilidade operacional.

Com o avanço das tecnologias de computação e visualização, uma nova era está surgindo nos campos da manutenção, a chamada manutenção prescritiva. Estende-se para além da mera previsão de falhas ao planejamento de manutenção proativo e inteligente, em vez de apenas monitorar a condição de saúde, o objetivo é permitir que a máquina tome sua própria decisão e oriente os usuários em direção a uma solução (LEE *et al.* 2020).

Tortorella *et al.* (2021), comentam que a adoção das tecnologias da I4.0 (análise de dados, simulações de manutenção, realidade aumentada para diagnóstico e inspeção), em empresas manufatureiras pode ocorrer por meio da cooperação entre produção e planejamento de manutenção para alcançar eficiência dos processos de manutenção e reduzir o custo total da produção, permitindo mudar de avaria a manutenção periódica. Outro termo para a integração das tecnologias I4.0 na manutenção é a Manutenção Inteligente.

Para Gordon *et al.* (2020), com o novo enfoque e renascimento da inteligência artificial, a manutenção preditiva (PdM) baseada em métodos com uso intensivo de dados tornar-se a solução mais eficaz para abordar a fabricação inteligente e *big data* industrial, especialmente para realizar a percepção da saúde (por exemplo, diagnóstico de falha e estimativa de vida útil remanescente. No final do Século XX, o prognóstico e gerenciamento da saúde (*Prognostic and Health Management* – PHM), foi apresentado pela primeira vez para o desenvolvimento de projetos militares, no entanto, nos últimos anos, o sistema PHM tornou-se uma solução infalível para gerenciar o estado de saúde do equipamento especialmente em equipamento industrial.

Aksa *et al.* (2021), comentam que o verdadeiro desafio de fábricas do futuro é a exigência de um alto grau de confiabilidade tanto em máquinas quanto em equipamentos, cujo sistema de manutenção mudou radicalmente para um novo, chamado de manutenção preditiva 4.0 (PdM 4.0) que é usado para evitar problemas de máquinas e aumentar a sua vida útil, tendo em conta que se as

máquinas não tiverem qualquer previsão de problema, eles nunca serão verificados. No entanto, precisa de muitas novas tecnologias emergentes, como a internet de infraestrutura de coisas, coleta e distribuição de dados de diferentes sensores inteligentes que análise e interpreta uma grande quantidade de dados.

Atualmente, está sendo introduzido o conceito de manufatura inteligente, baseado na integração de dispositivos inteligentes chamados sensores inteligentes e de acordo com o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – IEEE 1451, define sensores inteligentes como “sensores com memória pequena e conexão física padronizada para permitir a comunicação com processador e rede de dados”. Sensores inteligentes são muito úteis e podem fornecer segurança, garantir cuidados de saúde, bem-estar, ambiente de monitoramento e ser considerados como um elemento da quarta revolução industrial (AKSA *et al.* 2021).

Meissner, Rahn e Wicke (2021) comentam que surgiram novas tecnologias de monitoramento de condições que devem melhorar as operações de manutenção reduzindo custos e aumentando a disponibilidade da aeronave, mas ainda essas tecnologias estão em sua infância tecnológica, sendo necessário determinar o benefício esperado para as operações aéreas com a maturidade tecnológica e desenvolver estratégias de manutenção prescritiva adequadas, com objetivo de reduzir custos para obter vantagens competitivas. Para superar as limitações da manutenção programada da atual abordagem, os provedores de manutenção de aeronaves estão mudando seu foco de um cronograma de manutenção baseado em tempo, para uma manutenção baseada em condição lógica.

De acordo com a análise sobre a manutenção na I4.0 realizada por Nardo *et al.* (2021), apresenta que dentre as palavras-chave pesquisadas, manutenção preditiva, manutenção 4.0 estão em níveis de tendências altas, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Análises das palavras-chave

| Palavras-Chave | Frequência | Persistência | Ano mínimo | Ano Máximo |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| Manutenção Preditiva | 7 | 3 | 2018 | 2020 |
| Manutenção 4.0 | 6 | 3 | 2018 | 2020 |
| Sensores | 3 | 6 | 2015 | 2020 |

Fonte: Traduzido de Nardo *et al.* (2021)

Nardo *et al.* (2021), analisam por que a manutenção está abandonando sua tradicional estratégia e agora está se concentrando na utilização de uma abordagem preditiva e proativa (Manutenção Baseada em Condição). A aplicação de tais técnicas inclui uma infraestrutura que pode ser aprimorada usando o Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, nuvem e Informática. Manutenção 4.0 usa tecnologias avançadas para análise preditiva e fornece decisões com base na viabilidade e se comporta como uma manutenção preventiva para evitar a ocorrência de problemas que possam causar danos ou riscos, conforme apresentado na Tabela 1.

No contexto da I4.0, El Kihel, El Kihel e Bouyahrouzi (2022), comentam que a manutenção é frequentemente chamada de Manutenção 4.0 ou Manutenção Preditiva e é definido como um novo paradigma de manutenção que se baseia em três componentes principais:

- ✓ Monitoramento em tempo real da linha de produção, para detectar todos os tipos de desperdícios e falhas.
- ✓ Diagnóstico, localização e identificação das causas das anomalias sob as falhas observadas.
- ✓ O prognóstico tendo uma estimativa sobre o tempo de operação e sobre a evolução da degradação do problema para fazer boas escolhas.

Para El Kihel, Gziri e Bakdid (2021), a transformação da manutenção baseada em novas tecnologias vem germinando há vários anos, e os conceitos de manutenção inteligente e manutenção 4.0 estão se tornando populares na literatura. Especialmente porque a manutenção 4.0 ou preditiva visa melhorar o desempenho das linhas de produção e equipamento, fortalecendo o modelo de

negócios da a empresa com as tecnologias da I4.0, por exemplo: *Big Data*, IoT e inteligência artificial, a manutenção preditiva atinge um estágio avançado no diagnóstico e prognóstico de falhas, intimamente associadas a tecnologias de sensores conectados nas máquinas e equipamentos.

Giacotto *et al.* (2021), comentam que a estrutura de manutenção prescritiva inteligente (*Smart Prescriptive Maintenance Framework* - SPMF), introduzido por Paolanti *et al.* (2018), foi desenvolvido e testado em um estudo de caso para apoiar a introdução da manutenção prescritiva. A estrutura é construída em três domínios de interesse: a confiabilidade, disponibilidade, facilidade de manutenção e segurança do sistema (*system's reliability, availability, maintainability, and safety* - RAMS). O ambiente operacional no qual o sistema é operado, e o ambiente de manutenção que executará as tarefas de manutenção necessárias para restaurar o sistema às condições operacionais necessárias, dentro de suas características de confiabilidade pretendidas. Tempo e custo são tratados como restrições em todos os domínios.

Para Nordal e El-Thalji (2021), Espera-se que, com a introdução da I4.0 revolucione as práticas de manutenção atuais alcançando novos patamares de processos preditivos (processos de detecção, diagnóstico e prognóstico) e análise de manutenção prescritivo. Em geral, os novos paradigmas de manutenção (preditiva e prescritiva), são muitas vezes difíceis de justificar por causa de seus múltiplos compensações inerentes e causalidades de sistemas ocultos e também existe um grande número de terminologias que supostamente definem o gerenciamento da manutenção na I4.0, como e-Manutenção, manutenção inteligente, manutenção digital profunda e Manutenção 4.0, sendo adotado terminologia de manutenção inteligente pelos autores nesse trabalho, porque o termo Manutenção 4.0 pode trazer o questionamento sobre outras tecnologias da I4.0 como robótica, realidade aumentada, manufatura aditiva, ou impressão 3D.

Para Van der Broeck, Kalker e De Doncker (2021). os monitoramentos inteligente e tecnologias de manutenção (*Intelligent Monitoring and Maintenance Technologies* IMMs) são aplicados para programar a substituição

no tempo com base em dados de condição monitoradas quando as unidades conversoras de energia atingem um estágio definido de degradação para evitar falhas críticas no campo. Isso traz a vantagem de que cada unidade conversora é operada com segurança ao longo de sua vida operacional máxima viável, tal que o tempo de vida operacional médio geral de todas as unidades podem ser aumentadas, porém, esta abordagem requer sensores adicionais, recursos computacionais e uma rede de comunicação para trocar dados entre as unidades conversoras, sendo a Tecnologia de Manutenção Preditiva e a manutenção inteligente mais avançado, conhecida como manutenção preditiva.

Bustos *et al.* (2021), comentam que a quarta revolução industrial está mudando a forma de como as indústrias encaram seus problemas, incluindo a manutenção. Os novos trens são projetados, fabricados e mantidos seguindo uma metodologia da I4.0, mas a maioria dos trens atuais em operação não foram projetados com esta filosofia tecnológica, por isso devem ser adaptados no contexto da I4.0. Assim, um trem fabricado antes desse novo paradigma pode aproveitar as vantagens de Manutenção 4.0, em quatro etapas (sistema físico, gêmeo digital, informação e comunicação infraestrutura de tecnologia e diagnóstico), que compreendem os processos necessários para digitalizar um veículo ferroviário e que compartilham informações entre eles.

A manutenção para Errandonea, Alvarado, Beltrán e Arrizabalaga (2022), é uma das grandes preocupações do setor industrial e adquirir melhores níveis de maturidade da manutenção é um dos objetivos a ser atingido, sendo a manutenção prescritiva uma das áreas de pesquisa recente. E ainda os autores comentam, que os trabalhos atuais na literatura são focados em especificidades de manutenção estratégias (desde preventivas a prescritivas), geralmente relacionadas a um ativo fixo.

Com os avanços nas tecnologias de informação, Alcayaga, Wiener e Hansen (2019), comentam que aceleraram o desenvolvimento de abordagens de manutenção sofisticadas que usam tecnologias de detecção para obter *insights* mais profundos sobre a integridade dos sistemas e desempenho, causa de

falhas e vida útil restante. A manutenção é realizada de forma adaptativa, o que evita falhas catastróficas, tempo de inatividade ou substituição de peças desnecessárias, sendo três tipos principais: a manutenção baseada em condição, manutenção preditiva e manutenção prescritiva.

Grijalvo *et al.* (2020), comentam sobre a manutenção tradicional que é de resposta reativa a falhas em equipamentos ou dispositivos. sendo o pior cenário para manutenção e a manutenção preventiva capacita os operadores a realizar manutenção, procurando evitar situações críticas, aumentando o seu custo marginal. Na próxima evolução a estratégia de manutenção está ligada às capacidades preditivas, incorporando software inteligente em os dispositivos conectados fornecendo assim às máquinas uma espécie de inteligência. Para obter informações confiáveis sobre o objeto de produção, os sensores são instalados em diferentes partes da máquina para monitorar seu funcionamento em tempo real. Então, processamento de dados ocorre, seja em inteligência integrada nos sensores ou em inteligência que permite prever a falha das peças de reposição monitoradas da máquina. Para Sayyad *et al.* (2021), um aumento no tempo de inatividade não planejado das máquinas interrompe e degrada os negócios industriais, o que resulta em danos substanciais à credibilidade e perda monetária. Prever com precisão a vida útil do equipamento desempenha um papel vital na área de manutenção preditiva da I4.0.

Davoudian e Liu (2020), comentam que software para análise de dados, são classificados em três níveis, com base na profundidade de análise: análise descritiva, análise preditiva, análise prescritiva,

Saleem e Chishti (2019), comentam sobre a Indústria Inteligente, como um rápido avanço nas tecnologias de comunicação e a produção em organizações industriais está sendo deslocada de digital para inteligente, sendo a indústria inteligente um sistema que integra produção e serviços por sensores conectados em máquinas e equipamentos industriais. Os dados gerados pela indústria inteligente geralmente consistem em dados pertinentes aos registros da máquina e processos de fabricação. A análise desses dados resulta em

serviços como monitoramento de condição de máquinas, detecção e análise de falhas, gerenciamento da saúde da máquina, otimização da produção. Os dados coletados desses sensores podem ser usados para compreender, examinar e controlar ambientes complexos, facilitando maior inteligência, tomada de decisão e melhor desempenho.

Conforme Wellsandt *et al.* (2022), as estratégias de manutenção industrial dependem cada vez mais da inteligência artificial para prever as condições dos ativos e prescrever ações de manutenção. O software de manutenção relacionado e os profissionais de manutenção, podem formar um sistema híbrido de inteligência aumentada onde cada lado se beneficia e aprimora a inteligência do outro lado, adquirindo experiência com as tecnologias digitais na I4.0

Rousopoulou *et al.* (2022), destacam, que ao longo do tempo, três módulos principais, contribuem para a previsão de falhas de máquinas e ativam a manutenção preditiva: Aquisição de Dados, a Gestão do Conhecimento e a Manutenção Preditiva, para monitorar anomalias e lidar com condições imprevistas, para prever comportamentos futuros em séries temporais etc. Para ter sucesso na era da I4.0, é vital que os fabricantes trabalhem e explorem dados históricos e em tempo real, juntamente com dados não estruturados que precisam de um pré-processamento sério, para poder tomar decisões que equilibrem o produto e qualidade do trabalho, eficiência dos equipamentos industriais e capacidade de chão de fábrica. A tomada de decisão e o monitoramento em tempo real são parte integrante do *smart facturing* e capacitar as operações de manutenção preditiva na I4.0.

Kozłowski *et al.* (2021), apresentam um avançado sistema de medição multissensorial para fresadora como monitoramento de condição ferramenta foi apresentada. Assumiu-se que os dados coletados da força de 3 eixos e o sensor de torque pode ser usado como uma nova abordagem e uma alternativa ao típico sinal de vibração, monitoramento de saúde baseado e previsão de vida útil restante, quando integrado com técnicas de aprendizado de máquina que são consideradas uma solução poderosa.

Tortorella *et al.* (2022), tiveram descobertas que indicam que as tecnologias I4.0 que visam processar informações para apoiar a tomada de decisão e a tomada de ação afetam diretamente o desempenho da manutenção. Tecnologias orientadas para a detecção e a comunicação de dados entre máquinas, pessoas e produtos parecem moderar a relação entre Práticas de TPM e desempenho de manutenção. No entanto, a extensão dessa moderação varia de acordo com as práticas envolvidas, às vezes levando a efeitos negativos.

Como consideração final dessa Fundamentação Teórica, chegou-se à constatação, que os autores mencionam a manutenção prescritiva como um tipo de manutenção, sendo uma atividade de monitoramento prescritivo que busca a disponibilidade e confiabilidade operacional de máquinas e equipamentos do processos industriais, e também pode definir conceitos claros, objetivos e simples, reduzindo a diversidade de terminologias, proporcionando um gerenciamento de manutenção na I4.0, como sendo: três atividades de monitoramento (preditivo, prescritivo e detectivo) e três atividades de manutenção (corretiva, preventiva sistemática e preventiva de condição), com seus indicadores de desempenho específicos.

3. MÉTODO DE PESQUISA

A abordagem metodológica apresenta a classificação geral da pesquisa, na qual se fez pelo método, natureza, objetivos e abordagem (TURRIONI E MELLO, 2012), e os detalhes da pesquisa bibliográfica, da pesquisa de campo (documental e entrevistas) com fornecedores de sensores (6 empresas), bem como do planejamento da avaliação da aplicabilidade do método proposto por especialistas (4 empresas) da área de manutenção.

3.1. ESTRUTURA DA CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

As diversas formas de classificação de pesquisas de natureza, objetivo e abordagem desse estudo são apresentadas na Figura 5.

Para Turrioni e Mello (2012), na natureza a pesquisa é classificada em básica ou aplicada, em seus objetivos em exploratória, descritiva, explicativa e normativa, e quanto a abordagem, são classificadas em quantitativa e qualitativa. comentam os conceitos de cada classificação:

Essa pesquisa, foi classificada do ponto de vista de sua natureza, como aplicada, com interesse comercial por meio do desenvolvimento de novos processos e/ou produtos, orientados para a contribuição das necessidades do mercado industrial, além do avanço do conhecimento acadêmico.

Do ponto de vista de seus objetivos, a pesquisa foi classificada como exploratória, buscando a pesquisa bibliográfica, pesquisa de campo (documental e entrevistas) com fornecedores de sensores e planejamento da avaliação do método proposto por especialistas da área de manutenção. que estão ligados com o tema da pesquisa, para conhecimento da situação real no cenário acadêmico e industrial.

Quanto a sua abordagem, a pesquisa foi classificada como, qualitativa utilizado de desenvolvimento de novas teorias, para descrever a situação observada.

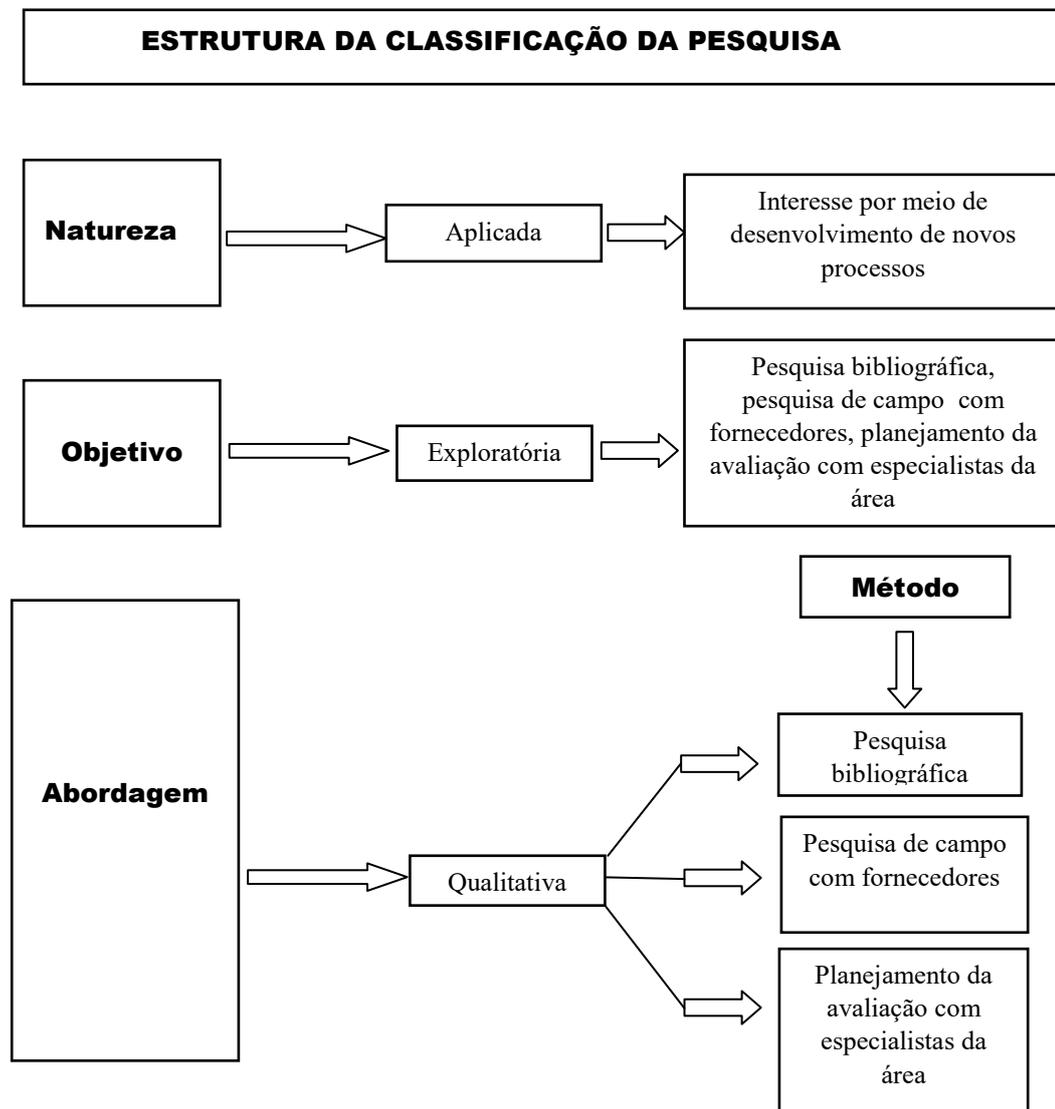


Figura 5: Estrutura da Classificação da pesquisa
 Fonte: Elaborada pelo autor a partir de Turrioni e Mello (2012)

Sendo assim, a pesquisa bibliográfica foi realizada pelo método de Revisão Narrativa e Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

Revisão narrativa é feita sem utilizar critérios explícitos e sistemáticos e a RSL é feita a partir de um protocolo específico de pesquisa e utilizando a análise de conteúdo para se obter os principais achados e tendências da amostra dos artigos pesquisados.

3.2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Pesquisa bibliográfica ou revisão da literatura para Turrioni e Mello (2012), é o processo de busca sobre os principais trabalhos já realizados, capazes de fornecer dados atuais e relevantes relacionado ao tema de pesquisa.

3.2.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SEM USO DE PROTOCOLO DE PESQUISA

Inicialmente foi realizado uma pesquisa na base de dados Scopus em 03/2022, sem uso do protocolo (sem filtros de tempo e de critérios), na qual foi identificado, uma grande quantidade de documentos pelas palavras-chave, conforme Quadro 4.

Quadro 4: Pesquisa sem uso do protocolo

| Palavra-Chave | Quantidade de documentos |
|------------------------------------------------|--------------------------|
| Atividade de monitoramento inteligente | 109.768 |
| Manutenção inteligente | 92.946 |
| Manutenção 4.0 | 21.058 |
| Atividade de manutenção | 815.313 |
| Manutenção preditiva e prescritiva | 514 |
| Monitoramento de máquinas | 491.404 |
| Manutenção preditiva de máquinas industriais | 12.593 |
| Manutenção prescritiva de máquinas industriais | 391 |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se no Quadro 4, uma grande quantidade de documentos, não refletindo o objetivo da pesquisa, e com as palavras-chave Manutenção 4.0, Manutenção Preditiva e Prescritiva o número de publicações, demonstrou que há possibilidades de contribuições, pois ainda não está consolidado o tema de pesquisa.

3.2.2. REVISÃO NARRATIVA

A revisão narrativa, foi feita sem utilizar critérios explícitos e sistemáticos para a busca e análise crítica da literatura, não esgotando as fontes de informações e nem aplicando estratégias de busca sofisticadas e exaustivas, e a seleção dos estudos e a interpretação das informações podem estar sujeitas à subjetividade, mas adequada para a fundamentação teórica, para o desenvolvimento dessa Tese, com 14 (quatorze) documentos analisados.

3.2.3. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

O método RSL, permite identificação, avaliação e seleção de estudos existentes (TRANFIELD, DENYER, ESMART, 2003), a partir de um protocolo estruturado de pesquisa, conforme descrito no Quadro 5.

3.2.4. PESQUISA E REFINAMENTO

Aplicando a *String* de busca sem aplicar o protocolo de pesquisa, resultou num conjunto de 474, 357, 301 e 361 documentos e aplicando o protocolo de pesquisa, resultou em 125, 96, 86 e 98 documentos. apresentado no Quadro 5.

Na sequência, foram aplicados três filtros, sobre a pesquisa para selecionar os artigos, assim detalhados:

- ✓ Primeiro filtro: Exclusão dos títulos não relacionados com objetivo da pesquisa, artigos duplicados, artigos (título, resumo e palavras-chave) sem conexão com as *strings* de busca, artigos publicados fora do período estabelecido, *sites* e teses, resultando 349, 261, 215 e 263 artigos rejeitados.
- ✓ Segundo filtro: Inclusão dos artigos (título, resumo e palavras-chave) com conexão com as *strings* de busca, artigos publicados no período

definido, nos idiomas previstos e os artigos mais citados, resultando 52, 30, 03 e 09 artigos.

- ✓ Terceiro filtro: Leitura dos resumos e das conclusões desses 52, 30, 03 e 09 artigos, com o intuito de selecionar somente os artigos que tratam o objetivo da pesquisa, resultando em 52, 13, 01 e 03 artigos para análise.

Com o protocolo de pesquisa apresentado no Quadro 5, foi possível atender o objetivo da pesquisa, e a Tabela 2, apresenta os artigos analisados por ano de publicação.

Tabela 2: Artigos para análise por ano de publicação

| Ano | RSL | Narrativa | Total |
|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 1994 | 00 | 01 | 01 |
| 2003 | 00 | 01 | 01 |
| 2012 | 00 | 01 | 01 |
| 2015 | 00 | 01 | 01 |
| 2016 | 00 | 02 | 02 |
| 2017 | 00 | 02 | 02 |
| 2018 | 09 | 03 | 12 |
| 2019 | 15 | 02 | 17 |
| 2020 | 22 | 01 | 23 |
| 2021 | 16 | 00 | 16 |
| 2022 | 06 | 00 | 06 |
| 2023 | 01 | 00 | 01 |
| Total | 69 | 14 | 83 |

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da revisão narrativa e da RSL foi possível identificar artigos relevantes ao tema de pesquisa que resultou em 83 artigos analisados.

Quadro 5: Protocolo de Pesquisa

| Estratégia | | Protocolo | | | |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Planejamento | Objetivo | Analisar a literatura científica relacionada ao monitoramento prescritivo de máquinas e equipamentos de processo industrial. | | | |
| | Questão da pesquisa | Como proporcionar disponibilidade e confiabilidade operacional de máquinas e equipamentos do processo industrial na Indústria 4.0? | | | |
| | Base de dados | Scopus | | | |
| | Palavras-chave | Smart Maintenance, Maintenance 4.0, Prescriptive Maintenance, Intelligent Maintenance | Prescriptive monitoring, industry 4.0 | prescriptive monitoring, method, industry 4.0 | prescriptive maintenance. industry 4.0 |
| | String de busca | (TITLE-ABS-KEY ("Smart Maintenance" OR "Maintenance 4.0" OR "Prescriptive Maintenance" OR "Intelligent Maintenance") AND PUBYEAR > 2018 AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) | prescriptive AND monitoring AND industry 4.0 AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) | prescriptive AND monitoring AND method AND industry 4.0 AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) | prescriptive AND maintenance AND industry 4.0 AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) |
| | Período | 2018 a março/2022 | 2018 a julho/2023 | 2018 a julho/2023 | 2018 a julho/2023 |
| | Idioma | Inglês | | | |
| | Critério de exclusão | <ul style="list-style-type: none"> • Títulos não relacionados com o objetivo da pesquisa. • Artigos duplicados. • Não contenham no título, resumo e palavras-chave às <i>strings</i> de busca. • Artigos publicados fora do período, Livros, Sites e Teses. | | | |
| Critérios de inclusão | <ul style="list-style-type: none"> • Artigos que contenham o título, resumo e palavras-chave às <i>strings</i> de busca. • Artigos publicados no período • Os 30 artigos mais citados | | | | |
| Execução | Artigos obtidos sem protocolo | 474 | 357 | 301 | 361 |
| | Artigos obtidos com protocolo | 125 | 96 | 86 | 98 |
| | Artigos selecionados | 52 | 30 | 03 | 09 |
| | Artigos RSL | 52 | 13 | 01 | 03 |

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.3. PESQUISA DE CAMPO (DOCUMENTAL E ENTREVISTAS) COM FORNECEDORES DE SENSORES

Foi realizada uma pesquisa de campo: documental com informações junto as empresas fornecedoras de sensores (Nacional e Global), na área de manutenção com objetivo de identificar possíveis soluções disponíveis. Essa pesquisa foi realizada por meio de análise de dados dos sites, e entrevistas com seus técnicos, observando que todos os fornecedores pesquisados apresentaram soluções em nível de manutenção preditiva, conforme descrito no Quadro 6

Quadro 6: Pesquisa de campo (documental e entrevistas) com empresas de sensores

| PESQUISA DE CAMPO COM EMPRESAS DE SENSORES | | | |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Empresa | Site | Entrevista | Observação |
| A | Inteligência Artificial (IA), Serviços Preditivos (IA), Máquina Ferramenta ACM, Proteção Inteligente de Processo | 03/04/2023 – Técnico de instrumentação Manutenção Preditiva, Sensor de vibração, temperatura. Sensor conectado, recebe o sinal e com inteligência artificial cria diagnostico com possível problemas de rolamentos etc., informa alarme , Usa ML (M2M) | Sem ação pelo sensor |
| B | Sensor IoT – Monitoramento de vibração e temperatura. Conexão com a nuvem – Processamento, armazenamento dos dados e reconhecimento de padrões. Equipamentos – Motores, rolamentos, redutores, mancais etc. Plataforma Online – (Manutenção 4.0): Relatório das frequências em tempo real (FFT), Horimetro de operação da máquina, Envio de alarmes por E-mail/SMS quando o equipamento mostrar sinais de desvios de seu comportamento normal, Comunicação com os sistemas de automação locais, Cálculo de KPI's de manutenção (MTBF, MTTR, Disponibilidade),Geração de histórico de indicadores. | 28/03/2023 – Técnico Manutenção Preditiva IoT Coleta de dados em tempo real Gera alarme Usa o modelo M2M FFT – <i>Fast Fourier Transform</i> (Transformação Rápida de Fourier) para 3eixos (horizontal, vertical e axial) | Sem ação pelo sensor |
| C | Sensor sem fio de vibração e temperatura, Solução da I4.0 para monitorar a condição de máquinas e componentes, aliada a manutenção preditiva, Bluetooth com sensores de vibração triaxial e temperatura que monitoram a saúde da máquina e realizam análise espectral, Os parâmetros medidos são visualizados no smartphone e seu histórico armazenado na plataforma WEB para análise e tomada de decisão, A coleta de dados é automatizada por meio de Gateway (condutor com a IoT) Aplicação – Equipamentos rotativos (máquinas/equipamentos), torre de resfriamento. | 28/03/2023 – Técnico/Comercial Manutenção Preditiva IoT Sensor de vibração e temperatura Sensor para cada ponto e também a nível global. FFT para 3eixos (horizontal, vertical e axial) Venda direta de sensor + plataforma | Sem ação pelo sensor |

(continua)

Quadro 6 (continuação): Pesquisa de campo (documental e entrevistas) com empresas de sensores

| PESQUISA DE CAMPO COM EMPRESAS DE SENSORES | | | |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| D | Sensores para I4.0 - Vibração e temperatura – Detecta todas as falhas possíveis com ampla faixa de frequência, incluindo falhas de rolamentos e engrenagens, Ultrassom – Detecta falhas em rolamentos e purgadores de vapor, Umidade e temperatura – Reduzir falhas em painéis elétricos, Sensor fusion Gateway – Através de gateways armazena na nuvem os dados dos sensores e do sistema de automação. Inteligência Artificial – Tiragem, Diagnostico, Fusão de técnica Manutenção prescritiva É uma equipe de P&D interna, desenvolve e fábrica sensores wireless, coletores de dados e softwares de inteligência artificial e aplicativos dedicados a manutenção preditiva. | 31/03/2023- comercial | Sem ação pelo sensor |
| E | Benefícios para manutenção preditiva de ativos industriais. Equipamentos monitorados de forma online 24 horas/dia 7 dias por semana, capaz de analisar a saúde dos equipamentos em tempo real, detectar possíveis falhas com antecedência e fornecer insights preditivos poderosos, aumentando assim a confiabilidade e a disponibilidade do ativo, reduzindo o tempo de inatividade e os custos de manutenção | 31/03/20223 – Comercial. | Sem ação pelo sensor |
| F | Sensores IoT operam com soluções de manutenção preditiva, analisando em tempo real a vibração, temperatura e horímetro, sendo que são inseridos na plataforma para o aprendizado de software os dados dos equipamentos, como modelo do ativo, RPM, potência, temperatura limite, tempo de parada limite, dados de rolamentos, engrenagens, ventiladores, correias e polias | 29/03/2023 – Técnico/comercial Manutenção preditiva, IoT, informa alarme para manutenção, Usa o ML (M2M) | Sem ação pelo sensor |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se no Quadro 6, que as empresas pesquisadas, Global e Nacional, apresentam soluções com dispositivos (sensores) por meio da IoT conectados aos equipamentos, buscando evitar a falha, por tendência de espectro e aviso e/ou alarme, mas não tomando decisão pelo sensor, para não evoluir a falha identificada.

De acordo com as entrevistas realizadas por telefone com as empresas, foi possível comprovar que, todas estão com sistema de manutenção preditiva.

3.4. PLANEJAMENTO DA AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO POR ESPECIALISTAS DA ÁREA DE MANUTENÇÃO.

Com objetivo de buscar saber qual a avaliação da aplicabilidade do Método proposto na prática, foi feito um planejamento em três etapas:

- Desenvolvimento de uma apresentação (*slides no MS-PowerPoint®*) para sintetizar a estrutura do Método proposto e elaboração de 4 (quatro) questões abertas a serem feitas aos participantes da avaliação;
- Feito o convite a profissionais de 6 (seis) empresas que faziam parte da network (ou rede de contatos) do autor desta tese. Esses profissionais tinham o perfil de serem responsáveis (Especialistas) pela gestão da manutenção das empresas;
- Agendamento e vídeo-chamada com as empresas convidadas (e que aceitaram) por meio da plataforma Google Meet, para apresentação do Método proposto e questionamento ao final.

Da primeira etapa do planejamento da avaliação de aplicabilidade foi elaborada uma apresentação-síntese do Método proposto e também foram formuladas as seguintes 4 (quatro) questões abertas a serem feitas aos participantes (Especialistas):

- 1) Qual a política de atividade de manutenção, de máquinas e equipamentos de processos industriais, realizada pela sua empresa atualmente?
- 2) Qual a atividade de monitoramento, de máquinas e equipamentos de processos industriais, realizada pela sua empresa atualmente?

- 3) Qual a sua opinião sobre o Método proposto para Monitoramento Prescritivo de Máquinas e Equipamentos de Processos Industriais proposto, quanto à aplicabilidade pela sua empresa?

- 4) Outros comentários sobre a aplicabilidade do Método proposto para Monitoramento Prescritivo de Máquinas e Equipamentos de Processos Industriais?

Da segunda etapa do planejamento, foram convidados a participar da avaliação, Profissionais (Especialistas) da área de manutenção de 6 (seis) empresas de segmentos de processos industriais diferentes, sendo: Papel e Celulose, Unidade de Negócios de Catalizador, Indústria Química e Química Automotiva. Dessas 6 (seis) empresas convidadas, 4 (quatro) participaram da avaliação com seus Profissionais (Especialistas) da área de manutenção.

O resultado da terceira etapa do planejamento, a apresentação e questionamento aos Profissionais (Especialistas), está descrito no Capítulo 5.

4. PROPOSTA E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA MONITORAMENTO PRESCRITIVO.

Foi possível observar, o que está apresentando na pesquisa bibliográfica e no mercado industrial, indicando uma oportunidade de melhoria para o tema pesquisado, tanto para os conceitos de manutenção e de monitoramento, uma vez que todas as terminologias apresentadas pelos autores, levam o termo manutenção, e sua aplicabilidade voltada apenas a identificação de falhas.

Propor um método para o monitoramento prescritivo, capaz de manter o equipamento operando sem evolução da falha, proporcionando disponibilidade e confiabilidade operacional de máquinas e equipamentos de processos industriais na Indústria 4.0, tais como: equipamentos rotativos e estáticos.

No contexto da I4.0, há falta de clareza e objetividade do conceito de manutenção e de monitoramento.

Para possibilitar um melhor entendimento com clareza e objetividade, propor novos conceitos, sabendo-se que a manutenção é uma atividade de execução de serviços, para reestabelecer um equipamento nas suas funções, podendo ser definida apenas como atividades de manutenção, e monitoramento como atividades de monitoramento.

Com novos conceitos, se tornam necessários o acompanhamento por indicadores de desempenho dessas atividades.

4.1. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

Autores como Marichal *et al.* (2020), Aransyah, Rosa e Colombo (2020), entre outros, comentam sobre a necessidade de métodos adequados e eficientes para uma manutenção eficaz, considerado o método de manutenção preditiva, e os autores Nardo *et al.* (2021), El Kihel, El Kihel e Bouyahrouzi

(2022), analisam que novas estratégias estão sendo utilizadas abandonando as tradicionais.

Com isso, o Método foi desenvolvido, com um roteiro de passos a partir do item 4.2, buscando a realização da atividade de manutenção preventiva de condição na real necessidade, por meio do monitoramento prescritivo *on-line* contínuo, com os seguintes passos:

- ✓ Passo 1 (P1): O PCM deve executar o macrofluxograma em sua integridade (Figura 6);
- ✓ Passo 2 (P2): Classificar as atividades de manutenção (Figura 7);
- ✓ Passo 3 (P3): Classificar as atividades de monitoramento (Figura 9);
- ✓ Passo 4 (P4): Aplicar o fluxograma da curva O-P para a atividade de monitoramento prescritivo (Figura 12).

4.2. PASSO 1 (P1): MACROFLUXOGRAMA

Conforme Figura 6, o PCM recebe Ordem de Serviço (OS), emite Ordem de Manutenção (OM) e registra histórico do equipamento e os dados para gerar os KPI's. Sendo a OS emitida pela operação quando for, uma atividade de manutenção corretiva, a OM emitida pelo PCM quando for uma atividade manutenção preventiva sistemática e/ou de condição.

De acordo com a rota definida para os equipamentos que terão atividades de monitoramento Preditivo (I3.0/I4.0), o PCM emite OM para ser realizado o monitoramento Preditivo Objetivo e Subjetivo (I3.0/I4.0), e se identificado o ponto potencial de falha, será programado a atividade de manutenção preventiva de condição (I3.0/I4.0), ou até mesmo, a atividade de manutenção preventiva sistemática (I2.0), notificando o processo operacional.

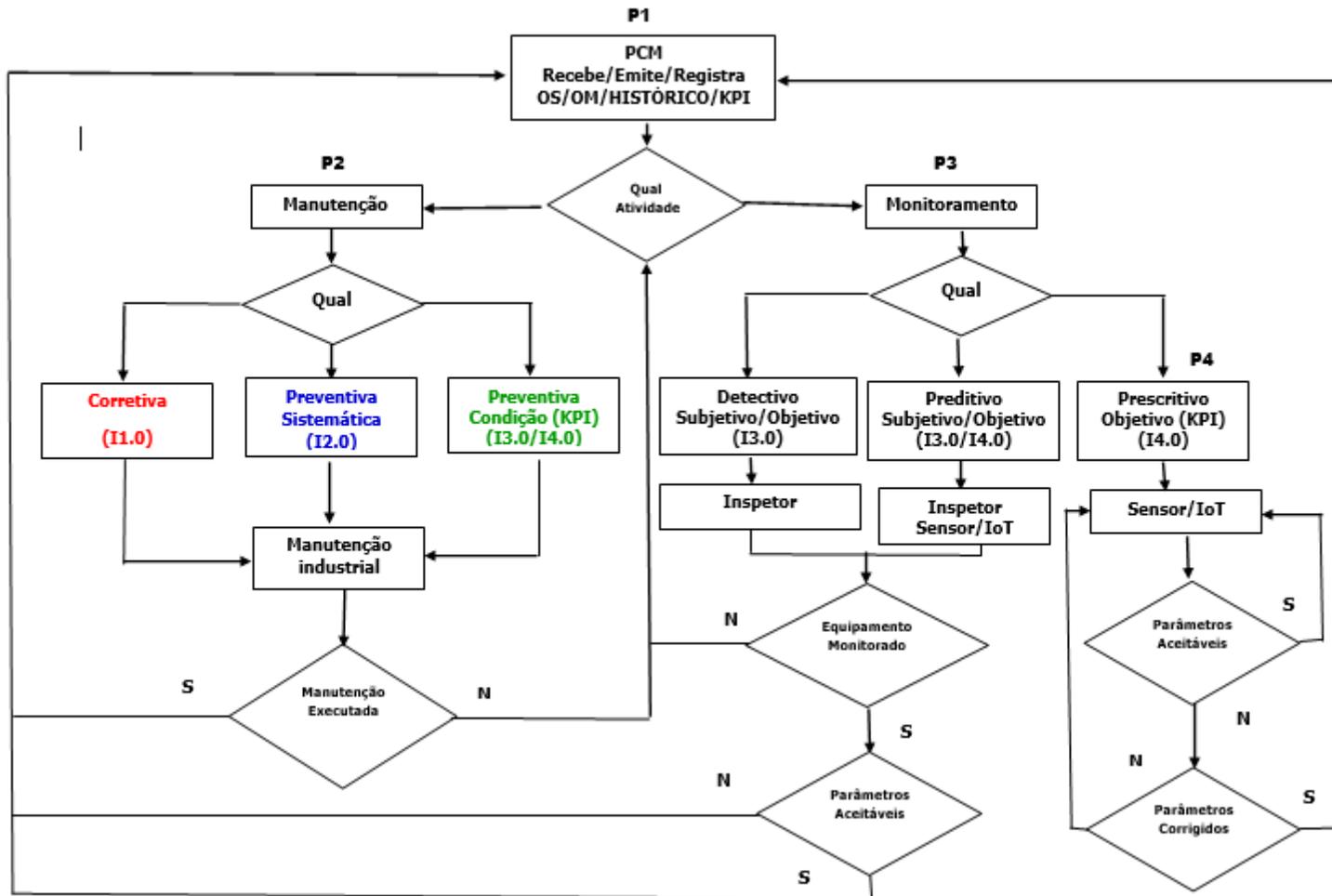


Figura 6: Macro fluxograma das Atividades de Monitoramento e da Manutenção
 Fonte: Elaborada pelo autor

4.3. PASSO 2 (P2): ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO

No contexto da I4.0, há falta de clareza e objetividade do conceito de manutenção. Para possibilitar um melhor entendimento com clareza e objetividade, pode-se definir, que a manutenção é uma atividade de execução de serviços, para reestabelecer um equipamento nas suas funções, podendo ser definida apenas como: atividades de manutenção, conforme apresenta a Figura 7.

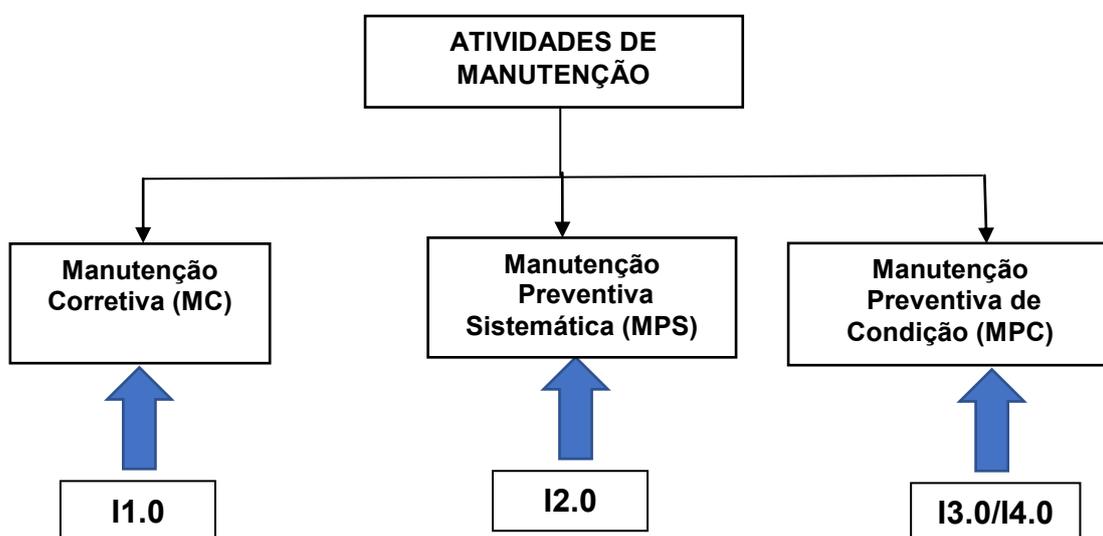


Figura 7: Atividades de Manutenção
Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se na Figura 7, que a atividade de manutenção corretiva (MC) da I1.0, acontece sempre após uma falha ocorrida, e a atividade de manutenção preventiva sistemática (MPS) da I2.0, permite a programação em tempo pré-determinado, sendo que a atividade de manutenção preventiva de condição (MPC), está no contexto da I3.0 e I4.0, isso porque a atividade de monitoramento preditivo é da I3.0 e se faz por meio de monitoramento *off-line* ou *on-line*, e a atividade de monitoramento prescritivo é da I4.0 e se faz por meio de conectividade de sensores/IoT nas máquinas/equipamentos, *on-line* contínuo.

Sendo assim, a atividade de manutenção industrial, se define como um conjunto de atividades de execução de serviços, dividida em:

- ✓ Atividade de Manutenção corretiva (MC) na I1.0: Execução da falha ocorrida;
- ✓ Atividade de Manutenção Preventiva Sistemática (MPS) na I2.0: Execução em intervalos de tempo pré-determinados;
- ✓ Atividade de Manutenção Preventiva de Condição (MPC) na I3.0 e I4.0: Execução somente quando for identificado a real necessidade

A Figura 8, apresenta o detalhe do passo 2 (P2) do macrofluxograma da Figura 6.

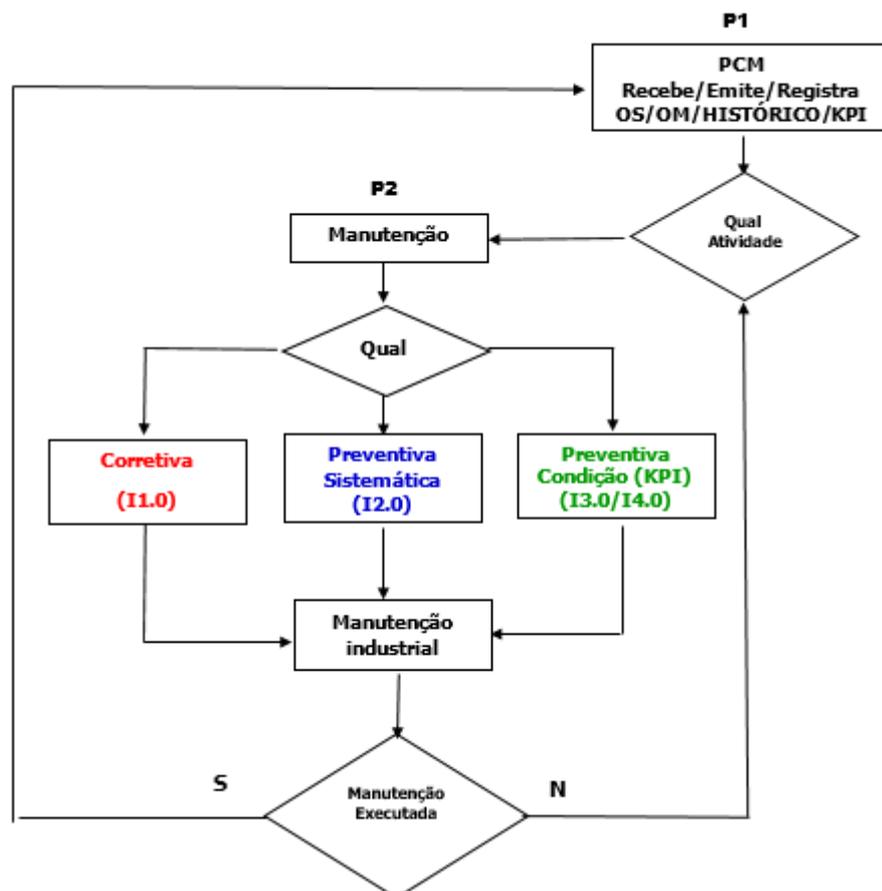


Figura 8: Detalhe do passo 2 (P2)
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se na Figura 8, a definição de qual atividade de manutenção será realizada.

4.4. PASSO 3 (P3): ATIVIDADES DE MONITORAMENTO

Ainda são considerados, os termos como manutenção preditiva, manutenção detectiva, e com o advento da I4.0, a manutenção prescritiva. Sendo que esses termos, não se referem à execução das atividades de manutenção, mas sim, à realização das atividades de monitoramento da condição real do equipamento, podendo ser definidas, apenas como atividades de monitoramento, conforme apresenta a Figura 9.

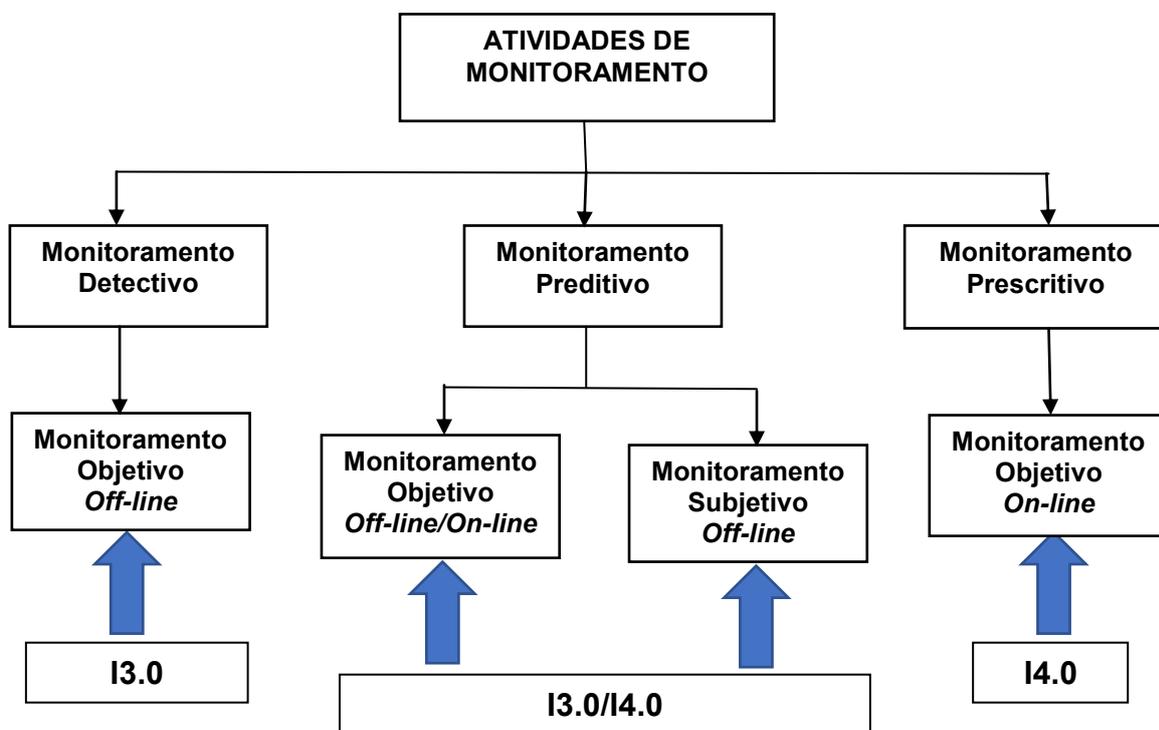


Figura 9: Atividades de Monitoramento
Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se na Figura 9, que as atividades de monitoramento estão no contexto da I3.0 e I4.0 e seus conceitos definidos conforme seguem.

- Os conceitos das atividades de monitoramento no contexto da I3.0/I4.0 podem ser definidos como:

- ✓ Monitoramento Detectivo: análise da condição do equipamento e sistema, indicando as falhas ocultas, por meio de medições off-line periódico e simulações.
- ✓ Monitoramento Preditivo: análise da condição do equipamento e sistema, indicando a necessidade de intervenção com base no estado do equipamento, por meio dos monitoramentos objetivo e subjetivo:
 - Monitoramento Objetivo: Identificação da condição operacional do equipamento, por meio de medição e acompanhamento de parâmetros, podendo ser *on-line* ou *off-line* periódico e *on-line* contínuo.

Esse monitoramento, passou a ser I4.0 a partir do momento que começou a ser utilizado sensores conectados, com utilização da IoT e remotamente.
 - Monitoramento Subjetivo: Identificação da condição operacional do equipamento, por meio dos sentidos humanos.
- O conceito da atividade de monitoramento no contexto da I4.0 pode ser definido como:
 - ✓ Monitoramento Prescritivo: Análise de condição do equipamento em tempo real, por meio de sensores inteligentes (sensores microprocessados), *on-line* contínuo que estabelecerá ações, ou seja, correções de parâmetros para evitar a falha, porém, mantendo o equipamento operando dentro dos padrões operacionais de processos aceitáveis.

A Figura 10, apresenta o detalhe do passo 3 (P3) do macrofluxograma da Figura 6.

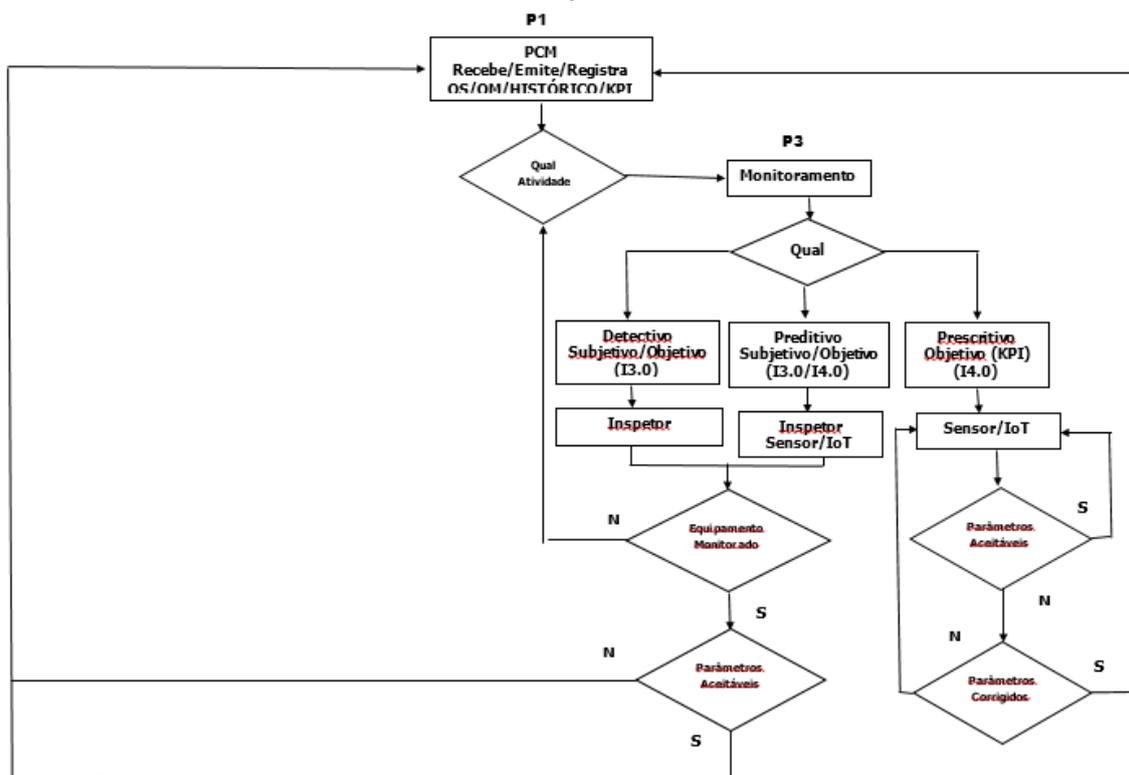


Figura 10: Detalhe do passo 3 (P3)
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Atividade de Monitoramento Prescritivo, apresentado na Figura 10, o conceito é de que quando alterar o parâmetro das variáveis, seja corrigido, e o equipamento continua operando dentro dos padrões operacionais de processos aceitáveis, sem que exista o desenvolvimento da falha identificada.

Com a Atividade de Monitoramento Prescritivo no contexto da I4.0, a estratégia de redução de paradas, para a atividade de manutenção preventiva sistemática (execução em intervalos de tempo pré-determinados), passa a ser realidade, e somente será executada a atividade de manutenção preventiva de condição (execução somente quando for identificado a real necessidade).

4.5. PASSO 4 (P4): CURVA O-P

Nesse contexto, pode-se ter a Curva O-P, apresentada na Figura11, onde “O” significa Ocorrência da correção do parâmetro e “P” significa parada.

- ✓ Ocorrência da correção do parâmetro: O conceito de ocorrência da correção do parâmetro, leva em consideração, o fato de que identificou e corrigiu os parâmetros operacionais possíveis, permitindo, que o equipamento não pare e continua produzindo.
- ✓ Tempo para Programação: Após o PCM ter recebido a notificação da correção do parâmetro do equipamento, será providenciado o material necessário e programação da atividade de manutenção preventiva de condição, notificando o processo operacional.
- ✓ Parada do Equipamento: A parada do equipamento, só será feita conforme programação e planejamento do PCM.

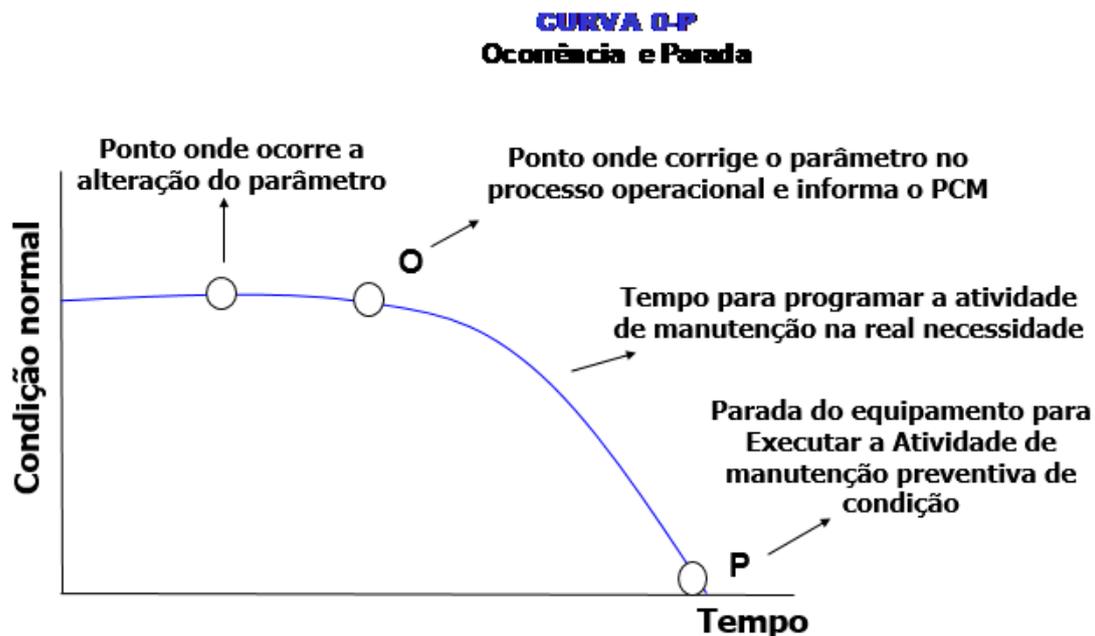


Figura 11: Curva O-P
Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se na Figura 11, que a partir do ponto "O", até o ponto "P", existe um intervalo que será o tempo para programação da execução da atividade de manutenção na real necessidade, porém, para que não ocorra parada inesperada do equipamento, foi corrigido o parâmetro no ponto "O" não evoluindo a falha identificada, e no ponto "P" será parado o equipamento para executar a atividade de manutenção preventiva de condição.

4.5.1. FLUXOGRAMA DA CURVA O-P

Considerando três variáveis de máquinas e equipamentos a serem monitoradas, a frequência de vibração (F), a pressão (P) e temperatura (T), a sequência que será identificado e corrigido um parâmetro, ao mesmo tempo em que informa ao PCM, será apresentado no fluxograma da curva O-P da Figura 12.

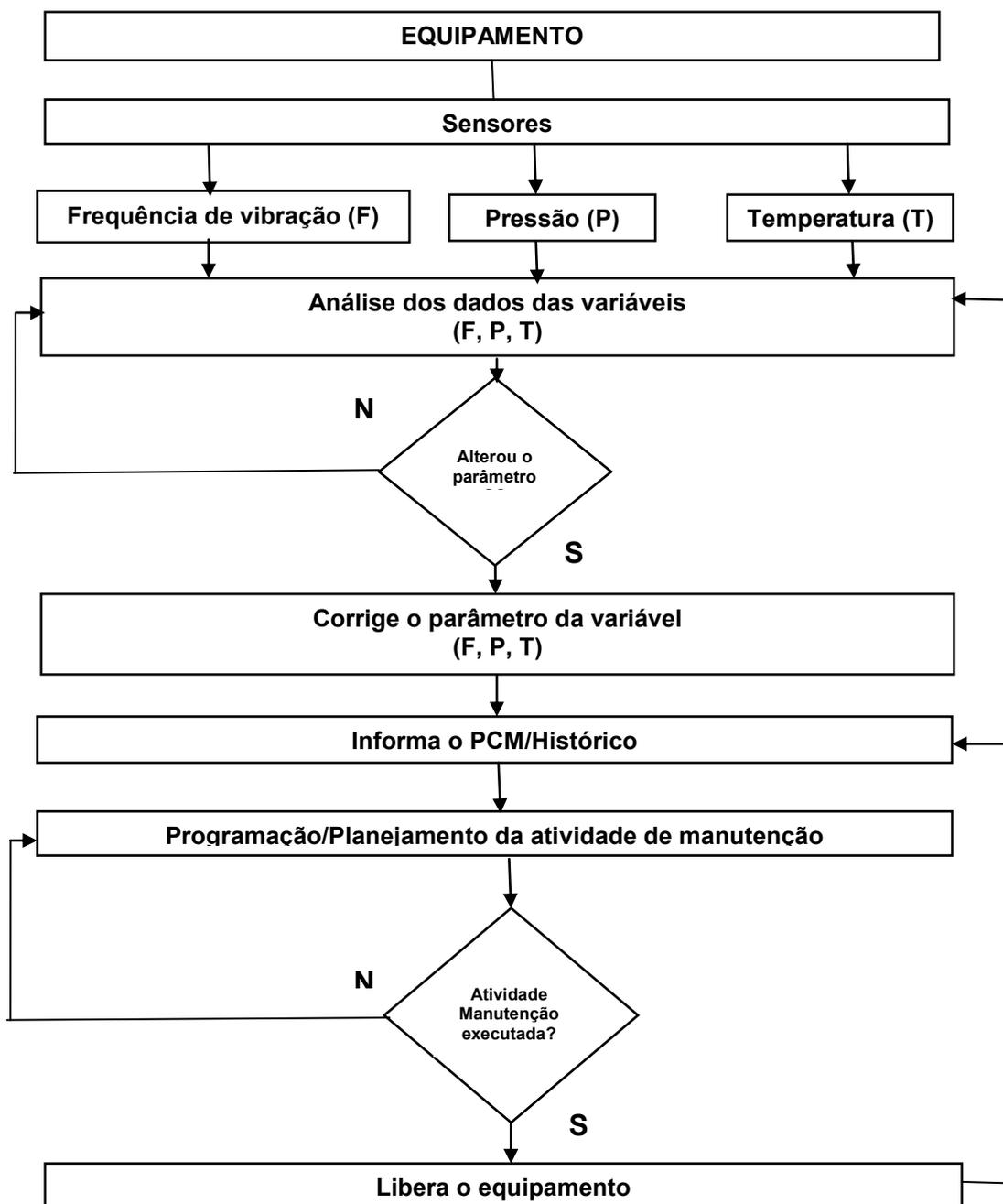


Figura 12: Fluxograma da Curva O-P
Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se na Figura 12, que assim que o equipamento for liberado para o processo operacional, o PCM será informado por meio da OM, e volta para análise de dados, devendo ser feito o histórico do equipamento.

A Figura 13, apresenta o detalhe do passo 4 (P4) do macrofluxograma da Figura 6.

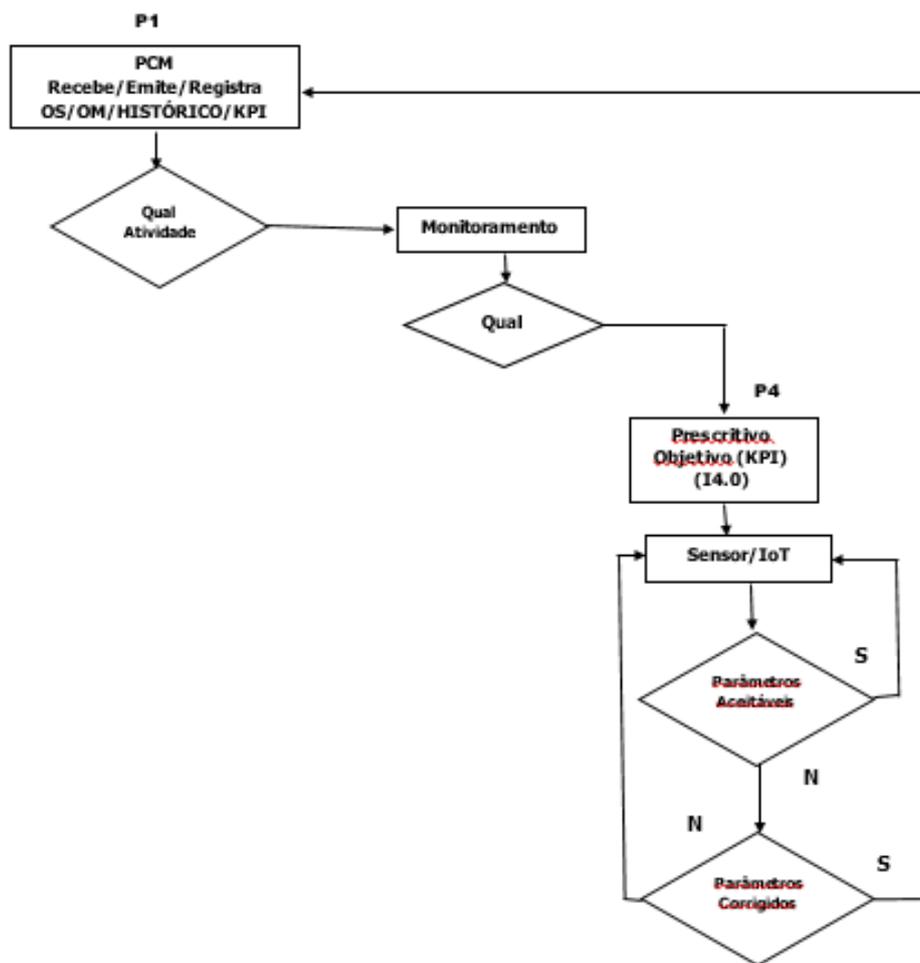


Figura 13: Detalhe do passo 4 (P4)
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se na Figura 13, que a atividade de monitoramento definida, é o monitoramento prescritivo objetivo.

4.6. INDICADORES DE DESEMPENHO

Com os novos conceitos claros e objetivos, se tornam necessários o acompanhamento de desempenho dessas atividades por 02 (dois) novos indicadores, desenvolvidos para essa finalidade, apresentados a seguir:

4.6.1. INDICADOR DA ATIVIDADE DE MONITORAMENTO PRESCRITIVO (MPrc)

Nesse indicador será acompanhado, a condição que o equipamento está operando sem apresentar falha potencial, ou seja, quanto maior for o MPC, apresenta que o TEO, está sob controle eficaz, conforme Equação 1.

$$\text{MPrc} = ((\text{TEO} \times \text{HTO}) / (\text{TEM} \times \text{HTP})) \times 100 \dots\dots\dots [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

- ✓ TEO: Total de Equipamentos que apresentaram Ocorrências no período e foram corrigidas;
- ✓ HTO: Horas Totais de Operação do equipamento no período;
- ✓ HTP: Horas Totais de Processo operacional do equipamento no período;
- ✓ TEM: Total de Equipamentos que estão sendo Monitorados pela atividade de monitoramento prescritivo no período.

4.6.2. INDICADOR DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CONDIÇÃO (MPC)

Nesse indicador será acompanhado, o HTM, ou seja, quanto menor for o HTM, maior será o MPC, apresentando a eficiência da atividade de manutenção realizada, conforme Equação 2.

$$\text{MPC} = \text{HTO} / (\text{HTO} + (\text{TEO} \times \text{HTM})) \times 100 \dots \dots \dots [\text{Eq. 2}]$$

Onde:

- ✓ HTO: Horas Totais de Operação do equipamento no período;
- ✓ TEO: Total de Equipamentos que apresentaram Ocorrências no período e foram corrigidas;
- ✓ HTM: Horas Totais gastas na atividade de Manutenção preventiva de

Portanto, com os quatro passos propostos e os dois novos indicadores, ficou detalhado de como é possível implantar o Método de Monitoramento Prescritivo proposto em um ambiente industrial de processo com equipamentos estáticos ou rotativos.

A aplicabilidade do Método proposto foi discutida com especialistas da área de manutenção e está descrita e detalhada no próximo Capítulo 5.

5. DISCUSSÃO E APLICABILIDADE PARA O MONITORAMENTO PRESCRITIVO

Entre os autores pesquisados, o termo manutenção sempre é usado como, manutenção preditiva e prescritiva, não se referindo, ao monitoramento, e o termo manutenção baseada em condição (CBM), é usado, com objetivo de identificar falha potencial de máquinas e equipamentos.

Outros autores, traz o termo manutenção como, manutenção baseada e condição (MBC), manutenção preventiva (PM), manutenção preditiva (PdM) baseada em condição, manutenção corretiva (MC), manutenção preventiva periódica (PPM), manutenção inteligente (SM), sistema de manutenção inteligente (IMS).

O método proposto, busca a disponibilidade e a confiabilidade operacional, por meio da atividade de monitoramento prescritivo na I4.0, e defini e reorganiza os conceitos de manutenção e de monitoramento, ficando mais claro e objetivo.

A aplicabilidade será desenvolvida em 4 (quatro) passos:

- ✓ O passo 1 (P1), deverá ser executado o macrofluxograma da Figura 6. Nesse passo, qual a atividade de manutenção a ser definida no passo 2 (P2), e qual a atividade de monitoramento a ser definida no passo 3 (P3).
- ✓ O passo 4 (P4), que apresenta o passo 2 (P2), o passo 3 (P3) e o passo 4 (P4), será observado o monitoramento prescritivo, que seguirá o fluxograma da curva O-P da Figura 12.

5.1. APLICABILIDADE DO MÉTODO PARA MONITORAMENTO PRESCRITIVO

Para os equipamentos, que terão atividades de monitoramento Prescritivo na I4.0 *on-line* contínuo, só será emitido uma OM, quando o PCM for notificado e notificar o processo operacional, de um parâmetro corrigido pelo sensor/IoT do equipamento, porém, o equipamento continuará operando sem evolução da falha identificada, possibilitando a programação da atividade da manutenção

preventiva de condição na I4.0, somente na real necessidade, garantindo a disponibilidade e confiabilidade operacional.

5.1.1. Atividades de Monitoramento Prescritivo

As atividades de Monitoramento prescritivo, espera-se que aconteçam nos equipamentos rotativos e estáticos de processos industriais, sendo que cada um terá suas variáveis de condições e seus parâmetros de acompanhamento bem definidos, como seguem:

- ✓ Equipamentos rotativos: Frequência de vibração (F) e Temperatura (T)
- ✓ Equipamentos estáticos: Pressão (P) e Temperatura (T)

5.1.1.1. Equipamentos Rotativos

Para os equipamentos rotativos apresenta-se esquematicamente a Figura 14, e podem ser considerados os seguintes exemplos:

- bombas centrífugas, bombas de vácuo, centrífugas,
- turbinas, compressor de ar comprimido, compressores de refrigeração.

Para esse tipo de equipamento será corrigida a velocidade, para que os níveis de parâmetros das variáveis medidas fiquem aceitáveis, sem evolução da falha identificada, de acordo com suas normas específicas.

Observa-se na Figura 14, que os sensores estão analisando os dados das variáveis (F) e (T), se houver alteração do parâmetro de uma dessas variáveis, será corrigida a velocidade, para que os níveis de parâmetros das variáveis medidas fiquem aceitáveis sem evolução da falha identificada, mantendo o equipamento em operação, dentro dos padrões de processos possíveis, e ao mesmo tempo informando ao PCM.

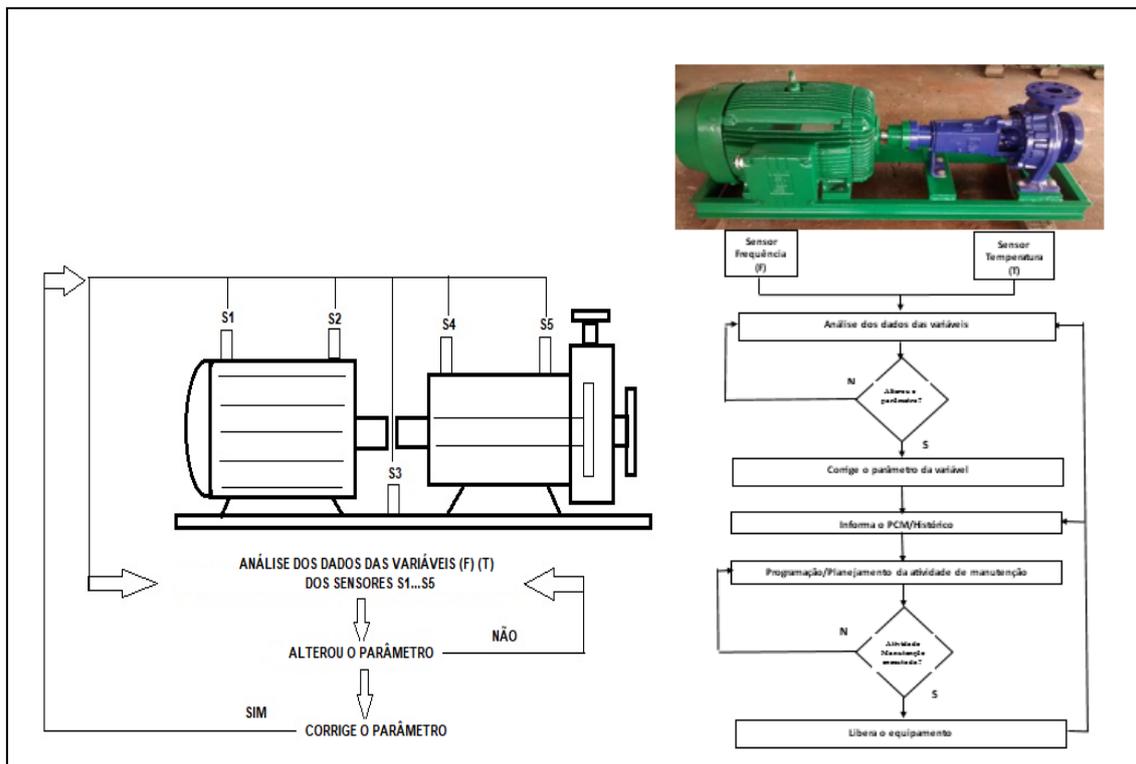


Figura 14: Equipamento rotativo e seu fluxograma
Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.1.2. Equipamentos Estáticos

Para os equipamentos estáticos apresenta-se esquematicamente a Figura 15, e podem ser considerados os seguintes exemplos:

- reatores de processo, vasos de pressão, reservatório de ar comprimido, e caldeiras

Para esse tipo de equipamento será corrigida a temperatura e/ou pressão, para que os níveis de parâmetros das variáveis medidas, fiquem aceitáveis, sem evolução da falha identificada, de acordo com suas normas específicas.

Observa-se na Figura 15, que os sensores estão analisando os dados das variáveis (P) e (T), se houver alteração do parâmetro de uma dessas variáveis, será corrigida a temperatura e/ou pressão, para que os níveis de parâmetros das variáveis medidas fiquem aceitáveis, sem evolução da falha identificada,

mantendo o equipamento em operação dentro dos padrões de processos possíveis, e ao mesmo tempo informando ao PCM.

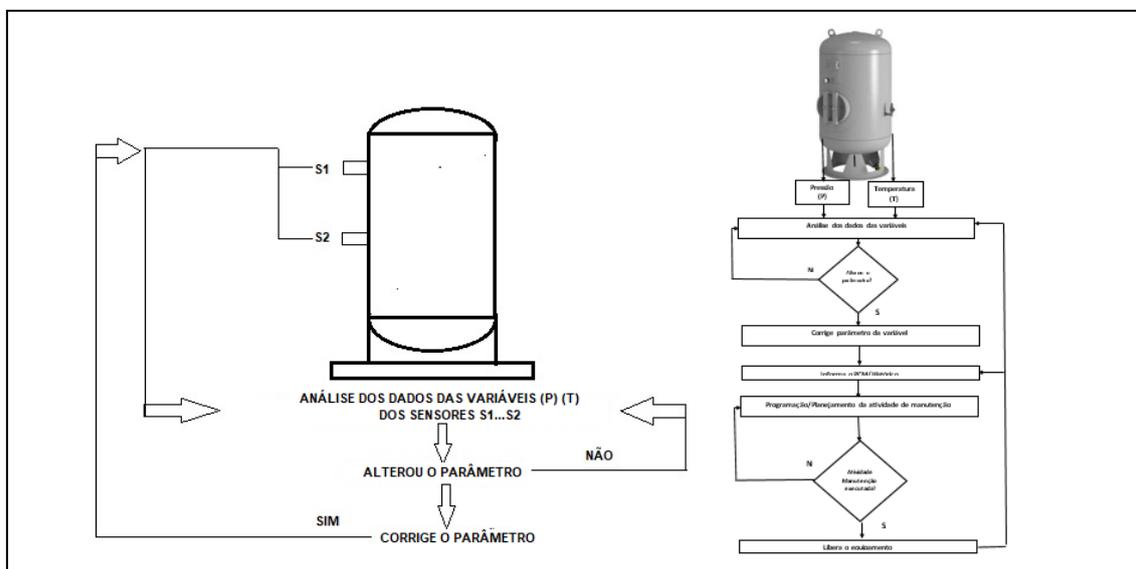


Figura 15: Equipamento estático e seu fluxograma

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2. APLICABILIDADE DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

Com os novos conceitos claros e objetivos, se torna necessário o acompanhamento do desempenho dessas atividades, que podem ser medidas pelos dois indicadores propostos: MPrc e MPC, exemplificados em detalhes a seguir.

O MPrc é o indicador da atividade de monitoramento prescritivo e mede o desempenho da condição operacional dos equipamentos monitorados.

O MPC é o indicador da manutenção preventiva de condição e mede a eficiência da atividade de manutenção.

5.2.1. INDICADOR DA ATIVIDADE DE MONITORAMENTO PRESCRITIVO (MPrc)

Esse indicador busca apresentar como exemplo, a condição operacional dos equipamentos monitorados, conforme os detalhes na Equação 1.

$$\text{MPrc} = ((\text{TEO} \times \text{HTO}) / (\text{TEM} \times \text{HTP})) \times 100 \dots \dots \dots [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

- ✓ TEO: **T**otal de **E**quipamentos que apresentaram **O**corrências no período e foram corrigidas, por exemplo: foram 4 equipamentos em 20 dias de 24 horas;
- ✓ HTO: **H**oras **T**otais de **O**peração do equipamento no período, por exemplo: foram 30 dias de 24 horas;
- ✓ HTP: **H**oras **T**otais de **P**rocesso operacional do equipamento no período, por exemplo: foram 20 dias de 24 horas;
- ✓ TEM: **T**otal de Equipamentos que estão sendo Monitorados, pela atividade de monitoramento prescritivo no período, por exemplo: foram 20 equipamentos.

$$\text{MPrc} = ((4 \times 480) / (20 \times 720)) \times 100$$

$$\text{MPrc} = 13,3\%$$

Resultado: No período de 20 dias do mês de outubro, 4 equipamentos apresentaram ocorrências, e no mês de novembro 1 equipamento apresentou ocorrência, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3: Resultado do Indicador MPrc

| Mês | TEM | HTP | TEO | HTO | MPrc |
|----------|-----|-----|-----|-----|-------|
| Outubro | 20 | 720 | 4 | 480 | 13,3% |
| Novembro | 20 | 720 | 1 | 480 | 3,3% |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto menor for o resultado do indicador MPrc, com a mesma quantidade de TEM no período, apresenta que o TEO está sob controle eficaz, apresentado na Tabela 3.

5.2.2. INDICADOR DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CONDIÇÃO (MPC)

Esse indicador busca apresentar como exemplo, a eficiência da atividade de manutenção, conforme os detalhes na Equação 2.

$$\text{MPC} = \text{HTO} / (\text{HTO} + (\text{TEO} \times \text{HTM})) \times 100 \dots \dots \dots [\text{Eq. 2}]$$

Onde:

- ✓ HTO: **H**oras **T**otais de **O**peração do equipamento no período, por exemplo: foram 30 dias de 24 horas;
- ✓ TEO: **T**otal de **E**quipamentos que apresentaram **O**corrências no período e foram corrigidas, por exemplo: foram 4 equipamentos em 20 dias de 24 horas;
- ✓ HTM: **H**oras **T**otais gastas na atividade de **M**anutenção preventiva de condição no período, por exemplo: foram 10 horas para cada equipamento.

$$\text{MPC} = 720 / (720 + (4 \times 10)) \times 100$$

$$\text{MPC} = 94,7\%$$

Resultado: No período de 20 dias do mês de outubro, 4 equipamentos apresentaram ocorrências e no mês de novembro 4 equipamentos apresentaram ocorrências, porém, no mês de novembro houve diminuição do HTM, conforme apresenta a Tabela 4.

Tabela 4: Resultado do Indicador MPC

| Mês | HTO | TEO | HTM | MPC |
|----------|-----|-----|-----|-------|
| Outubro | 720 | 4 | 10 | 94,7% |
| Novembro | 720 | 4 | 5 | 97,3% |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto menor for o HTM, maior será o resultado do indicador MPC, apresentado, a eficiência da atividade de manutenção preventiva de condição conforme apresenta a Tabela 4.

5.3. AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO POR ESPECIALISTAS DA ÁREA DE MANUTENÇÃO

Conforme já descrito anteriormente (Capítulo 3), foi realizada uma avaliação da aplicabilidade do Método proposto junto a Profissionais (Especialistas) pela gestão da manutenção das empresas, cujos perfis estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7: Empresas e seus especialistas

| Empresa | Data/Hora | Segmento | País | Cargo | Função |
|---------|---------------------|------------------------------------|----------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1 | 07/11/2023 09:00 | Unidade de Negócios de Catalizador | Alemanha | Diretor | Head of Automation & Digital |
| 2 | 10/11/2023 11:00 | Papel e Celulose | Brasil | Gerente Industrial | Produção, Meio Ambiente e Utilidades |
| | | | | Supervisor de TI | Tecnologia da Informação |
| | | | | Gerente de Engenharia de Manutenção | Engenharia e Manutenção |
| | | | | Supervisor Elétrica, Eletrônica e Instrumentação | Manutenção Elétrica, Eletrônica e Instrumentação |
| 3 | 10/11/2023 16:00 | Indústria Química | Brasil | Gerente de Manutenção e Serviços Técnicos | Tecnologia e Infraestrutura da América do Sul |
| 4 | 14/11/2023 11:00 | Química Automotiva | Brasil | Engenheiro de Manutenção | Gerenciamento dos serviços técnicos |
| | | | | Engenheiro do PCM | Planejamento e programação das atividades de manutenção |

Fonte: Elaborado pelo autor

As empresas apresentadas no Quadro 7, são de grande porte, Global e Nacional.

Para saber qual a aplicabilidade do Método proposto, foram formuladas 4 (quatro) questões para os Profissionais (Especialistas), e a síntese das respostas de cada uma delas estão apresentadas e detalhadas a seguir.

Questão 1) Qual a política de atividade de manutenção de máquinas e equipamentos de processos industriais, adotada pela sua empresa atualmente? Respostas apresentadas na Quadro 8.

Quadro 8: Respostas dos Especialistas da questão 1

| Empresa | Resposta |
|----------------|------------------------------------------------------------------|
| 1 | 80% Manutenção preventiva sistemática e 20% manutenção corretiva |
| 2 | Manutenção preventiva sistemática e manutenção corretiva |
| 3 | 40% Manutenção preventiva sistemática e 40% manutenção corretiva |
| 4 | 60% Manutenção preventiva sistemática e 35% manutenção corretiva |

Fonte: Elaborado pelo autor

As empresas se encontram em um nível de manutenção preventiva sistemática, muito forte, conforme o que foi apresentado no Quadro 8.

Questão 2) Qual a atividade de monitoramento de máquinas e equipamentos de processos industriais, adotado pela sua empresa atualmente? Respostas apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9: Respostas dos Especialistas da questão 2

| Empresa | Resposta |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 40% Monitoramento preditiva off-line/on-line e 10% Monitoramento prescritivo on-line sem tomada de ação. |
| 2 | Monitoramento Preditivo off-line e iniciando on-line |
| 3 | 20% Monitoramento Preditivo off-line e um equipamento rotativo on-line |
| 4 | 5% Monitoramento Preditivo off-line. |

Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente responderam como manutenção e não como monitoramento, sendo que as empresas estão caminhando para o monitoramento preditivo, e empresa “1” um pouco mais evoluída, conforme o que foi apresentado no Quadro 9.

Questão 3) Qual a sua opinião, sobre a aplicabilidade do Método para Monitoramento Prescritivo de Máquinas e Equipamentos de Processos Industriais proposto, quanto sua aplicabilidade pela sua empresa? Respostas apresentadas no Quadro 10.

Quadro 10: Respostas dos Especialistas da questão 3

| Empresa | Resposta |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Muito aplicável, principalmente para equipamentos rotativos. Para equipamentos estáticos aplicável para transformadores e reatores de energia elétrica e pouco aplicável para equipamentos estáticos de processo industrial. |
| 2 | Aplicabilidade interessante, devendo ter limites de parâmetros de processos operacionais, aplicáveis em alguns equipamentos rotativos e estáticos. |
| 3 | Aplicabilidade interessante , principalmente para sistemas críticos, como maior aplicação em equipamentos rotativos e em menor escala para equipamentos estáticos. |
| 4 | Aplicabilidade ótima , principalmente para nossos equipamentos rotativos críticos (Exaustores, Recirculadores, Ventiladores das torres de resfriamento, compressores de refrigeração) para equipamentos estáticos de processo industrial. |

Fonte: Elaborado pelo autor

Observar-se no Quadro 10, que as respostas pelas empresas foram unânimes, que o método proposto é aplicável em suas empresas, com maior aplicação nos equipamentos rotativos, e até citados em quais equipamentos poderiam ser aplicado o método, conforme o que foi apresentado no Quadro 10.

Questão 4) Outros comentários sobre a aplicabilidade do Método para Monitoramento Prescritivo de Máquinas e Equipamentos de Processos Industriais proposto. Respostas apresentados no Quadro 11.

Quadro 11: Respostas dos Especialistas da questão 4

| Empresa | Resposta |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Válida a aplicação para o processo industrial, com esforço necessário para o treinamento no PCM (Mudança de cultura), criando critério de avaliação dos parâmetros. Os conceitos definidos ficaram bem mais claros e objetivos. Para futuros trabalhos, desenvolver artigo apresentando a execução do método proposto em máquinas e equipamentos. |
| 2 | Válida a aplicação para o processo industrial, sendo importante de além de informar o PCM, informar também o processo operacional, com os conceitos claros e objetivos. Fazer uma análise de viabilidade técnica/econômica. |
| 3 | Válida a aplicação para o processo industrial, com necessidade de treinamento técnico e conscientização (mudança de cultura), com os conceitos claros e objetivos. Fazer uma análise de viabilidade técnica/econômica. |
| 4 | Válida a aplicação para o processo industrial, com necessidade de treinamento técnico e conscientização (mudança de cultura), com os conceitos claros e objetivos. Fazer uma análise viabilidade técnica/econômica |

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se no Quadro 11, que as respostas pelas empresas foram unânimes e positivas, acerca da aplicabilidade do Método proposto e dos novos conceitos de manutenção e de monitoramento para o processo industrial, com boas

considerações sobre análise da viabilidade técnica/econômica, com algumas condições que favorecem o uso e aplicação do mesmo.

5.4. IMPLICAÇÕES PARA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO

As implicações para aplicabilidade do método proposto, serão de acordo com as condições de cada empresa, necessitando conhecer bem o roteiro passo-a-passo do método proposto, pelos gestores de manutenção, buscando a viabilidade técnica e econômica, ao mesmo tempo em que os treinamentos para toda a equipe, fará a diferença no entendimento para sua aplicação, ainda mais por ser ele capaz de proporcionar, com seu uso regular e crescente de maturidade, níveis de produtividade antes não alcançados.

6. CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi atingido, ao propor um método para o monitoramento prescritivo de máquinas e equipamentos rotativos e estáticos de processos industriais na I4.0. O método proposto mostrou, que com alteração em relação ao método praticado atualmente nas indústrias, pode-se ter benefícios, com as atividades de manutenção e com as atividades de monitoramento, com seus conceitos bem definidos, claros e objetivos, e com seus indicadores de desempenho para acompanhamento dessas atividades. O objetivo foi atendido plenamente, com a contribuição prática, com resultado da aplicabilidade do método proposto, avaliado por especialistas da área de manutenção, de empresas global e nacional, como aplicável para o processo industrial.

Destaque-se que, durante o desenvolvimento desse estudo, notou-se na pesquisa bibliográfica, que os autores em geral apresentam os tipos de manutenção, não observando as diferenças entre as atividades de manutenção e de monitoramento. A pesquisa bibliográfica contribuiu para verificar a situação atual da literatura em relação à abordagem do tema na I4.0, além de apontar os trabalhos mais relevantes para análise e entendimento do assunto, a pesquisa de campo (documental e entrevistas) com os fornecedores de sensores e a avaliação dos especialistas da área e manutenção, contribuíram para confirmar a situação do mercado e da área industrial.

Outro destaque deve ser feito com relação à aplicação da tecnologia, pois a atividade de manutenção preventiva de condição por meio da atividade de monitoramento prescritivo, com sensores conectados em máquinas e equipamentos de processos industriais, coletando dados em tempo real contínuo, contribui para a disponibilidade e confiabilidade operacional com estabilidade do processo industrial.

Além disso, a pesquisa bibliográfica, a pesquisa de campo (documental e entrevistas) com os fornecedores de sensores e a avaliação dos especialistas

da área de manutenção, contribuíram para o conhecimento científico acadêmico e prático pelas seguintes razões:

- ✓ Preencher uma lacuna da pesquisa, para desenvolver as atividades de manutenção e as atividades de monitoramento;
- ✓ Definir novos conceitos, com mais clareza e objetividade para melhor entendimento da área de gestão da manutenção;
- ✓ Fornecer a relação com as empresas, promovendo o Método e novos conceitos das atividades de manutenção e das atividades de monitoramento;
- ✓ Propagar o Método e os novos conceitos e os indicadores de desempenho das atividades de manutenção preventiva de condição e das atividades de monitoramento prescritivo, por ser ainda pouco explorado pelos profissionais de gestão da indústria em geral.

Considera-se, que o método proposto servirá como apoio para o desenvolvimento de pesquisas futuras, para tanto são apresentadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Qual será o impacto nas indústrias, com as mudanças dos conceitos das atividades de manutenção e das atividades de monitoramento?
- ✓ Como será a aplicabilidade do Método, em empresa de pequeno porte, mesmo que seja nas principais máquinas e equipamentos dos processos industriais?

Propõe-se também, desenvolver Treinamento na indústria de processos, com as mudanças, para o crescimento da organização, apresentando os resultados com a aplicabilidade do Método proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aksa, K., Aitouche, S., Bentoumi, H., & Sersa, I. (2021). Developing a web platform for the management of the predictive maintenance in smart factories. *Wireless Personal Communications*, 119, 1469-1497.

Alcayaga, A., Wiener, M., & Hansen, E. G. (2019). Towards a framework of smart-circular systems: An integrative literature review. *Journal of cleaner production*, 221, 622-634.

Ales, Z., PAVLŮ, J., Legát, V., Mošna, F., & Jurča, V. (2019). Methodology of overall equipment effectiveness calculation in the context of Industry 4.0 environment. *Eksplatacja i Niezawodność*, 21.

Alvarez-Alvarado, M. S., & Jayaweera, D. (2020). Operational risk assessment with smart maintenance of power generators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117, 105671.

Ansari, F., Glawar, R., & Nemeth, T. (2019). PriMa: a prescriptive maintenance model for cyber-physical production systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32, 482-503.

Antoni, J., & Borghesani, P. (2019). A statistical methodology for the design of condition indicators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 114, 290-327.

Aransyah, D., Rosa, F., & Colombo, G. (2020). Smart maintenance: A wearable augmented reality application integrated with CMMS to minimize unscheduled downtime. *Computer-Aided Design and Applications*, 17, 740-751.

Berredjem, T., & Benidir, M. (2018). Bearing faults diagnosis using fuzzy expert system relying on an improved range overlaps and similarity method. *Expert Systems with Applications*, 108, 134-142.

Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., Wuest, T., & Stahre, J. (2020). Smart Maintenance: an empirically grounded conceptualization. *International Journal of Production Economics*, 223, 107534.

Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., Wuest, T., & Stahre, J. (2020). Smart Maintenance: a research agenda for industrial maintenance management. *International Journal of Production Economics*, 224, 107547.

Bukhsh, Z. A., Saeed, A., Stipanovic, I., & Doree, A. G. (2019). Predictive maintenance using tree-based classification techniques: A case of railway switches. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 101, 35-54.

Bustos, A., Rubio, H., Soriano-Heras, E., & Castejon, C. (2021). Methodology for the integration of a high-speed train in Maintenance 4.0. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8, 1605-1621.

Ciffolilli, A., & Muscio, A. Industry 4.0 (2018): national and regional comparative advantages in key enabling technologies. *European Planning Studies*, 26, 2323-2343.

Coito, T., Viegas, J. L., Martins, M. S., Cunha, M. M., Figueiredo, J., Vieira, S. M., & Sousa, J. M. (2019). A Novel Framework for Intelligent Automation. *IFAC-PapersOnLine*, 52, 1825-1830.

Daniyan, I., Mpofu, K., Oyesola, M., Ramatsetse, B., & Adeodu (2020). Artificial intelligence for predictive maintenance in the railcar learning factories. *Procedia Manufacturing*, 45, 13-18.

Davoudian, A., & Liu, M. (2020). Big data systems: A software engineering perspective. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53, 1-39.

Di Nardo, M., Clericuzio, M., Murino, T., & Sepe, C. (2020). An Economic Order Quantity Stochastic Dynamic Optimization Model in a Logistic 4.0 Environment. *Sustainability*, 12, 4075.

El Kihel, A., Gziri, H., & Bakdid, A. (2021). Method of Implementing Maintenance 4.0 In Industry A Case Study of An Industrial System. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 78-84.

El Kihel, Y., El Kihel, A., & Bouyahrouzi, E. M. (2022). Contribution of Maintenance 4.0 in Sustainable Development with an Industrial Case Study. *Sustainability*, 14, 11090.

Errandonea, I., Alvarado, U., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2022). A Maturity Model Proposal for Industrial Maintenance and Its Application to the Railway Sector. *Applied Sciences*, 12, 8229.

Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316.

Fonseca, L., Amaral, A., & Oliveira, J. (2021). Quality 4.0: the EFQM 2020 model and industry 4.0 relationships and implications. *Sustainability*, 13, 3107.

Foresti, R., Rossi, S., Magnani, M., Bianco, C. G. L., & Delmonte, N. (2020). Smart society and artificial intelligence: big data scheduling and the global standard method applied to smart maintenance. *Engineering*, 6, 835-846.

Fox, H., Pillai, A. C., Friedrich, D., Collu, M., Dawood, T., & Johanning, L. (2022). A review of predictive and prescriptive offshore wind farm operation and maintenance. *Energies*, 15, 504.

Fusko, M. I. R. O. S. L. A. V., Rakyta, M. I. R. O. S. L. A. V., Krajcovic, M., Dulina, L. U. B. O. S. L. A. V., Gaso, M. A. R. T. I. N., & Grznar, P. A. T. R. I. K. (2018). Basics of designing maintenance processes in industry 4.0. *MM Science Journal*, 2018, 2252-2259.

Fuzi, N. F. A., & Ismail, F. B. (2019). Intelligent maintenance prioritization and optimization strategies for thermal power plant boilers.

Giacotto, A., Costa Marques, H., Pereira Barreto, E. A., & Martinetti, A. (2021). The need for ecosystem 4.0 to support maintenance 4.0: An aviation assembly line case. *Applied Sciences*, 11, 3333.

Gopalakrishnan, M., Bokrantz, J., Ylipää, T., & Skoogh, A. (2015). Planning of maintenance activities—A current state mapping in industry. *Procedia CIRP*, 30, 480-485.

Gordon, C. A. K., Burnak, B., Onel, M., & Pistikopoulos, E. N. (2020). Data-driven prescriptive maintenance: failure prediction using ensemble support vector classification for optimal process and maintenance scheduling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59, 19607-19622.

Grijalvo Martín, M., Pacios Álvarez, A., Ordieres-Meré, J., Villalba-Díez, J., & Morales-Alonso, G. (2020). New business models from prescriptive maintenance strategies aligned with sustainable development goals. *Sustainability*, 13, 216.

Hawkridge, G., Mukherjee, A., McFarlane, D., Tlegenov, Y., Parlikad, A. K., Reyner, N. J., & Thorne, A. (2021). Monitoring on a shoestring: Low cost solutions for digital manufacturing. *Annual Reviews in Control*, 51, 374-391.

Jasiulewicz-Kaczmarek, M., & Gola, A. (2019). Maintenance 4.0 technologies for sustainable manufacturing-an overview. *IFAC-PapersOnLine*, 52, 91-96.

Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Legutko, S., & Kluk, P. (2020). Maintenance 4.0 technologies—new opportunities for sustainability driven maintenance. *Management and production engineering review*, 11.

Kadir, B. A., & Broberg, O. (2020). Human well-being and system performance in the transition to industry 4.0. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 76, 102936.

Karim, R., Westerberg, J., Galar, D., & Kumar, U. (2016). Maintenance analytics—the new know in maintenance. *IFAC-PapersOnLine*, 49, 214-219.

Koot, M., Mes, M. R., & Iacob, M. E. (2021). A systematic literature review of supply chain decision making supported by the Internet of Things and Big Data Analytics. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107076.

Kozłowski, E., Antosz, K., Mazurkiewicz, D., Sęp, J., & Żabiński, T. (2021). Integrating advanced measurement and signal processing for reliability decision-making. *Eksploatacja i Niezawodność*, 23.

Lee, J., Ni, J., Singh, J., Jiang, B., Azamfar, M., & Feng, J. (2020). Intelligent maintenance systems and predictive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142.

Li, A. Q., Rich, N., Found, P., Kumar, M., & Brown, S. (2020). Exploring product–service systems in the digital era: a socio-technical systems perspective. *The TQM Journal*, 32, 897-913.

Liang, S., Rajora, M., Liu, X., Yue, C., Zou, P., & Wang, L. (2018). Intelligent manufacturing systems: a review. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 7, 324-330.

Liu, B., Lin, J., Zhang, L., & Kumar, U. (2019). A dynamic prescriptive maintenance model considering system aging and degradation. *IEEE Access*, 7, 94931-94943.

Ma, S., Liu, W., Cai, W., Shang, Z., & Liu, G. (2019). Lightweight deep residual CNN for fault diagnosis of rotating machinery based on depthwise separable convolutions. *IEEE Access*, 7, 57023-57036.

Magadán, L., Suárez, F. J., Granda, J. C., & García, D. F. (2020). Low-cost real-time monitoring of electric motors for the industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 42, 393-398.

Mantravadi, S., & Møller, C. (2019). An overview of next-generation manufacturing execution systems: how important is MES for industry 4.0? *Procedia manufacturing*, 30, 588-595.

Marichal, G. N., Ávila, D., Hernández, A., & Padrón, I. (2020). A new intelligent approach in predictive maintenance of separation system. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 14, 385-390.

Meissner, R., Rahn, A., & Wicke, K. (2021). Developing prescriptive maintenance strategies in the aviation industry based on a discrete-event simulation framework for post-prognostics decision making. *Reliability Engineering & System Safety*, 214, 107812.

Moens, P., Bracke, V., Soete, C., Vanden Hautte, S., Nieves Avendano, D., Ooijevaar, T., ... & Van Hoecke, S. (2020). Scalable fleet monitoring and visualization for smart machine maintenance and industrial IoT applications. *Sensors*, 20, 4308.

Nardo, M. D., Madonna, M., Addonizio, P., & Gallab, M. (2021). A mapping analysis of maintenance in Industry 4.0. *Journal of applied research and technology*, 19, 653-675.

Nemeth, T., Ansari, F., Sihn, W., Haslhofer, B., & Schindler, A. (2018). PriMa-X: A reference model for realizing prescriptive maintenance and assessing its maturity enhanced by machine learning. *Procedia CIRP*, 72, 1039-1044.

Nordal, H., & El-Thalji, I. (2021). Lifetime benefit analysis of intelligent maintenance: Simulation modeling approach and industrial case study. *Applied Sciences*, 11, 3487.

Norma Brasileira NBR-5462. (1994). ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Confiabilidade e Manutenibilidade, Rios de Janeiro, RJ.

Odważny, F., Wojtkowiak, D., Cyplik, P., & Adamczak, M. (2019). Concept for measuring organizational maturity supporting sustainable development goals. *Log Forum*, 15.

Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 127-182.

Paolanti, M., Romeo, L., Felicetti, A., Mancini, A., Frontoni, E., & Loncarski, J. (2018). Machine learning approach for predictive maintenance in industry 4.0. In 2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA) (pp. 1-6). IEEE.

Pelantova, V., & Cecak, P. (2018). New aspects of maintenance management and the material of spare parts. In: *MM Science Journal*, 1, 2283-2289, 2018.

Poór, P., Basl, J., & Zenisek, D. (2019). Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development. In *International Research*

Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE) (pp. 245-253). IEEE.

Qin, T., Wang, B., Chen, R., Qin, Z., & Wang, L. (2019). IMLADS: intelligent maintenance and lightweight anomaly detection system for internet of things. *Sensors*, 19, 958.

Ramadan, M., Shuqqo, H., Qtaishat, L., Asmar, H., & Salah, B. (2020). Sustainable competitive advantage driven by big data analytics and innovation. *Applied Science*, 10, 6784.

Rauch, E., Linder, C., & Dallasega, P. (2020). Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105644.

Rousopoulou, V., Vafeiadis, T., Nizamis, A., Iakovidis, I., Samaras, L., Kirtsoglou, A., ... & Tzovaras, D. (2022). Cognitive analytics platform with AI solutions for anomaly detection. *Computers in Industry*, 134, 103555.

Saleem, T. J., & Chishti, M. A. (2019). Data analytics in the Internet of Things: a survey. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 20, 607-630.

Sayyad, S., Kumar, S., Bongale, A., Kamat, P., Patil, S., & Kotecha, K. (2021). Data-driven remaining useful life estimation for milling process: sensors, algorithms, datasets, and future directions. *IEEE Access*, 9, 110255-110286.

Schütze, A., Helwig, N., & Schneider, T. (2018). Sensors 4.0—smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0. *Journal of Sensors and Sensor systems*, 7, 359-371.

Schwab, K. A (2016). *Quarta Revolução Industrial*; Tradução Daniel Moreira Miranda, São Paulo, Edipro, ISBN 978- 85-7283-978-5.

Seneviratne, D., Ciani, L., Catelani, M., & Galar, D. (2018). Smart maintenance and inspection of linear assets: An Industry 4.0 approach. *Acta Imeko*.

Shang, C., Yang, F., Huang, B., & Huang, D. (2018). Recursive slow feature analysis for adaptive monitoring of industrial processes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65, 8895-8905.

Sharma, R., & Govindaraju, N. (2010). Intelligent support system a maintenance planning activity. In 2010 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering (pp. 331-335). IEEE.

Shin, J. H., & Jun, H. B. (2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2, 119-127.

Silva, A. J., Cortez, P., Pereira, C., & Pilastrri, A. (2021). Business analytics in Industry 4.0: A systematic review. *Expert systems*, 38, e12741.

Tortorella, G. L., Fogliatto, F. S., Cauchick-Miguel, P. A., Kurnia, S., & Jurburg, D. (2021). Integration of industry 4.0 technologies into total productive maintenance practices. *International Journal of Production Economics*, 240, 108224.

Tortorella, G., Saurin, T. A., Fogliatto, F. S., Tlapa, D., Moyano-Fuentes, J., Gaiardelli, P., ... & Forstner, F. F. (2022). The impact of Industry 4.0 on the relationship between TPM and maintenance performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33, 489-520.

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British journal of management*, 14, 207-222.

Tupa, J., Simota, J., & Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 11, 1223-1230.

Tupa, J., Simota, J., & Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 11, 1223-1230.

Turner, C. J., Emmanouilidis, C., Tomiyama, T., Tiwari, A., & Roy, R. (2019). Intelligent decision support for maintenance: an overview and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32, 936-959.

Turrioni J. B., Mello C. H. P. (2012) Metodologia em pesquisa em Engenharia de Produção, Estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

Valamede, L. S., & Akkari, A. C. S. (2020). Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 5, 851.

Van der Broeck, C. H., Kalker, S., & De Doncker, R. W. (2021). Intelligent monitoring and maintenance technology for next generation power electronic systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.

Vlasov, A. I., Echeistov, V. V., Krivoshein, A. I., Shakhnov, V. A., Filin, S. S., & Migalin, V. S. (2018). An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment. *Journal of applied engineering science*, 16, 515-522.

Wang, N., Ren, S., Liu, Y., Yang, M., Wang, J., & Huisingh, D. (2020). An active preventive maintenance approach of complex equipment based on a novel product-service system operation mode. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123365.

Wellsandt, S., Klein, K., Hribernik, K., Lewandowski, M., Bousdekis, A., Mentzas, G., & Thoben, K. D. (2022). Hybrid-augmented intelligence in predictive maintenance with digital intelligent assistants. *Annual Reviews in Control*, 53, 382-390.

Wen, Y., Wu, J., Zhou, Q., & Tseng, T. L. (2018). Multiple-change-point modeling and exact Bayesian inference of degradation signal for prognostic improvement. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16, 613-628.

Werbińska-Wojciechowska, S., & Winiarska, K. (2023). Maintenance Performance in the Age of Industry 4.0: A Bibliometric Performance Analysis and a Systematic Literature Review. *Sensors*, 23, 1409.

Xu, Y., Zhou, Y., Sekula, P., & Ding, L. (2021). Machine learning in construction: From shallow to deep learning. *Developments in the built environment*, 6, 100045.

Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*, 13, 2213-2227.