

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO DE MELO SILVA

**FRAMEWORK PARA ANÁLISE DE MATURIDADE EM INDÚSTRIA 4.0:
ROADMAP DE IMPLEMENTAÇÃO COM FOCO EM PMES**

PATO BRANCO

2022

GUSTAVO DE MELO SILVA

**FRAMEWORK PARA ANÁLISE DE MATURIDADE EM INDÚSTRIA 4.0:
ROADMAP DE IMPLEMENTAÇÃO COM FOCO EM PMEs**

**Framework for maturity analysis in Industry 4.0: implementation roadmap
focused on SMEs**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Gilson Adamczuk Oliveira

PATO BRANCO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco



GUSTAVO DE MELO SILVA

**FRAMEWORK PARA ANÁLISE DE MATURIDADE EM INDÚSTRIA 4.0: ROADMAP DE IMPLEMENTAÇÃO
COM FOCO EM PMES**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia De Produção E Sistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Dos Sistemas Produtivos.

Data de aprovação: 22 de Agosto de 2022

Dr. Gilson Adamczuk Oliveira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Dalmarino Setti, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Guilherme Luz Tortorella, Doutorado - The University Of Melbourne

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 22/08/2022.

AGRADECIMENTOS

Para alcançar este mérito, passei por vários momentos marcantes, posso dizer que passei por várias conquistas que me proporcionaram amadurecimento. Momentos estes que me fizeram lutar e ter persistência diante das dificuldades e buscar sempre transcender os sentimentos negativos. Agora estou aqui e realmente posso gritar: “CONSEGUI!”. Contudo, esta conquista não foi só minha, e reforço a minha crença de que não consegui nada sozinho, pois ela foi composta de relações interpessoais e toda conquista é coletiva! Por este motivo agradeço:

A DEUS, pois foi a certeza de que ELE me permitiria viver apenas o que fosse para o meu BEM, que me inspirei nas inúmeras vezes em que tive que recomeçar, especialmente, nos momentos de solidão e desespero.

No âmbito familiar, palavras não são suficientes para agradecer toda a compreensão e paciência que recebi nestes anos de caminhada. À minha amada esposa Tatiana Michels, meu raio de sol. Nunca irei esquecer o quanto me ajudou. A você minha eterna gratidão!

Ao meu orientador, Professor Doutor Gilson Adamczuk Oliveira, pela compreensão, amizade e incentivo que sempre demonstram desde o momento que o conheci. Seus ensinamentos deixaram marcas imprescindíveis para a minha vida pessoal e acadêmica.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas que contribuíram para o meu crescimento acadêmico. À secretária da Pós-Graduação, Adriani Michelon, pela atenção, principalmente ao responder as minhas dúvidas e aos meus e-mails sempre com muita presteza.

A todos vocês, o meu agradecimento.

RESUMO

Os conceitos e potenciais benefícios associados à aplicação de ferramentas tecnológicas da indústria 4.0 têm chamado a atenção de empresas e instituições técnico-científicas como oportunidade de incremento do potencial competitivo das organizações em um mercado turbulento. Assim, pode-se perceber a relevância e complexidade de decisões relacionadas ao cenário de negócio de empresas para promoção da competitividade. No Brasil, as Pequenas e Médias Empresas (PMEs) são marcadas pela necessidade de melhoria da competitividade, apesar de ter significativa relevância para a economia nacional, ainda possuem insuficiências a serem sanadas em relação ao aspecto competitivo. Porém, para o planejamento de ações de melhoria da competitividade, é pertinente que seja avaliado o estado atual da organização em relação a referenciais competitivos para um melhor estabelecimento de objetivos estratégicos. Neste cenário, surgem os modelos de maturidade que são ferramentas para suporte a este tipo de avaliação. Apesar da existência de variados modelos com este propósito, muitos não possuem clareza metodológica e de parametrização, além de não serem adequadamente alinhados com as particularidades das PMEs. Sendo assim, esta pesquisa busca preencher a lacuna encontrada no campo científico, bem como contribuir para a gestão organizacional a partir do desenvolvimento e aplicação de um *framework* para avaliação de PMEs em termos de maturidade tecnológica da indústria 4.0, baseada em uma abordagem suportada pelos métodos de apoio a tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e pelo método *Fuzzy-TOPSIS*. Como forma de demonstração da aplicabilidade do framework, foi realizada a avaliação em uma PME do ramo metalmeccânico. Em termos de resultado a empresa obteve um nível de maturidade de 2,8 em um valor máximo de cinco, também foram analisados os principais aspectos associados aos atributos avaliados. O resultado obtido serviu de base para a aplicação do *roadmap* de implementação, com base nas dimensões com pontuação mais baixa. Esse *roadmap* norteou uma série de ações implementadas pela organização com o intuito de elevar a maturidade da organização baseada nos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0.

Palavras-chave: indústria 4.0; modelo de maturidade; pequenas e médias empresas; *roadmap* de implementação.

ABSTRACT

The concepts and potential benefits associated with the application of Industry 4.0 technological tools have attracted the attention of companies and technical-scientific institutions as an opportunity to increase the competitive potential of organizations in a turbulent market. Thus, it is possible to perceive the relevance and complexity of decisions related to the business scenario of companies to promote competitiveness. In Brazil, Small and Medium Enterprises (SMEs) are marked by the need to improve competitiveness, despite having significant relevance to the national economy, they still have insufficiencies to be remedied in relation to the competitive aspect. However, for the planning of actions to improve competitiveness, it is pertinent that the current state of the organization is evaluated in relation to the competitive references for a better establishment of the strategic objectives. In this scenario, maturity models emerge that are tools to support this type of evaluation. Despite the existence of several models for this purpose, many lack methodological clarity and parameterization, in addition to not being properly aligned with the particularities of SMEs. Therefore, this research seeks to fill the gap found in the scientific field, as well as to contribute to organizational management from the development and application of a framework for evaluating SMEs in terms of technological maturity of industry 4.0, based on an approach supported by methods decision support Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Fuzzy-TOPSIS method. As a way of demonstrating the applicability of the framework, the evaluation was carried out in an SME in the metal-mechanic sector. In terms of results, the company obtained a maturity level of 2.8 out of a maximum value of five, the main aspects associated with the evaluated attributes were also analyzed. The result obtained served as the basis for the implementation of the implementation roadmap, based on the dimensions with the lowest score. This roadmap guided a series of actions implemented by the organization with the objective of increasing the maturity of the organization based on the concepts and technologies of Industry 4.0.

Keywords: industry 4.0; maturity model; small and medium enterprises; implementation roadmap.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da Fundamentação Teórica	18
Figura 2 - Estrutura de desenvolvimento da pesquisa	19
Figura 3 - Aplicação do Método AHP.	45
Figura 4 - Estruturação hierárquica do problema	46
Figura 5 - Desenvolvimento da Pesquisa	53
Figura 6 - Roadmap de implementação da Indústria 4.0	57
Figura 7 - Avaliação dos MMs x Variável linguística.....	65
Figura 8 - Níveis de Maturidade por Dimensão	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Artigos e seus respectivos periódicos	29
Quadro 2 - Dimensões utilizadas pelos modelos de maturidade analisados	43
Quadro 3 - Escala Fundamental de Saaty.....	45
Quadro 4 - Perfil dos Gestores.....	54
Quadro 5 - Perfil dos entrevistados	55
Quadro 6 - Artigos e nomenclaturas do MM.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de preferências dos critérios	46
Tabela 2 - Índice médio de consistência randômica	47
Tabela 3 - Matriz de preferências das alternativas	48
Tabela 4 - Termos e valores linguísticos	49
Tabela 5 - Classificação PME segundo o BNDES	61
Tabela 6 - Matriz de Julgamentos	62
Tabela 7 - Cálculo do vetor de prioridades	63
Tabela 8 - Variável linguística e números <i>Fuzzy</i>	63
Tabela 9 - Critérios x Variável linguística x Números Fuzzy	64
Tabela 10 - Variável linguística x Números Fuzzy	64
Tabela 11 – Avaliações em variável linguística	66
Tabela 12 – Avaliações em números <i>fuzzy</i>	66
Tabela 13 - Matriz de Decisão Fuzzy <i>D</i> normalizada.....	67
Tabela 14 - Matriz de decisão Fuzzy normalizada e ponderada <i>V</i>	67
Tabela 15 - Distância das alternativas em relação a A^+	68
Tabela 16 - Distância das alternativas em relação à A^-	69
Tabela 17 - Coeficiente de aproximação (CC_i) e ranking das alternativas.....	69

LISTA DE SIGLAS

3DP	Impressão 3D
AHP	Analytical Hierarchy Process
AM	Fabricação Aditiva
BNDES	Banco nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CC	Computação em Nuvem
CPS	Sistema Cyber Físico
DPMM	Modelo de Maturidade do Processo de Entrega
DRL	Nível de Preparação Digital
ERP	Planejamento de Recursos Empresariais
ERP	Enterprise Resource Planning
FAHP	Processo de Análise Hierárquica Difusa
H2M	Homem a Máquina
IaaS	Infraestrutura como Serviço
IOS	Internet dos Serviços
IOT	Internet das Coisas
M2M	Máquina a Máquina
MES	Sistema de Execução da Manufatura
MM	Modelo de Maturidade
MT	Máquinas-Ferramenta
NFT	Número Fuzzy Triangular
PaaS	Plataforma como Serviço
PBL	Aprendizagem Baseada em Problemas
PME	Pequena e Média Empresa
POM	Gerenciamento de Produção e Operações
PPC	Planejamento e Controle de Produção
RFID	Identificação por Radiofrequência
SaaS	Software como Serviço
SCM	Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos
SIMMI	Modelo de Maturidade Sistema Integrado para Indústria
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Problema de Pesquisa	15
1.3	Objetivos da Pesquisa	15
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivos específicos	15
1.4	Justificativa	16
1.5	Metodologia de desenvolvimento da dissertação	17
1.6	Estrutura da dissertação	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Indústria 4.0	21
2.2	Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0	22
2.2.1	Sistemas cyber-físicos (CPS)	22
2.2.2	Big Data	24
2.2.3	Internet das Coisas (IoT)	25
2.2.4	Computação em nuvem	27
2.3	Modelos de maturidade da Indústria 4.0	28
2.3.1	Modelo 1: Desenvolvimento de modelo de maturidade para avaliação da implementação da indústria 4.0: teoria e prática de aprendizagem	30
2.3.2	Modelo 2: Uma proposta do modelo de maturidade da Indústria 4.0	31
2.3.3	Modelo 3: uma abordagem de avaliação de maturidade para conceber roadmaps específicos de contexto na indústria 4.0	32
2.3.4	Modelo 4: Definição e avaliação dos níveis de maturidade da Indústria 4.0 - caso do setor de defesa	34
2.3.5	Modelo 5: Modelo de maturidade em três estágios em PMEs rumo à Indústria 4.0	35
2.3.6	Modelo 6: Desenvolvimento de um modelo de maturidade da indústria 4.0 para o processo de entrega na cadeia de abastecimento	37
2.3.7	Modelo 7: Um modelo de maturidade da indústria 4.0 com base em regras fuzzy para operações e gerenciamento da cadeia de fornecimento	38

2.3.8	Modelo 8: Uma ferramenta de avaliação baseada no nível de maturidade para melhorar a implementação de uma Indústria 4.0 em pequenas e médias empresas.....	39
2.3.9	Modelo 9: Um modelo de maturidade da Indústria 4.0 para empresas de máquinas-ferramentas	41
2.3.10	Modelo 10: Avaliação da prontidão digital de PMEs italianas: uma pesquisa de estudo de caso	42
2.4	Discussão dos modelos de maturidade apresentados.....	43
2.5	Método de auxílio à decisão Analytic Hierarchy Process.....	44
2.6	Método Fuzzy TOPSIS.....	48
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	53
3.1	Desenvolvimento do Estudo.....	53
3.1.1	Seleção dos Respondentes	54
3.1.2	Coleta de dados	54
3.1.3	Roadmap de implementação	56
3.1.4	Análise de dados	58
3.2	Obtenção da informação.....	58
3.2.1	Definição dos critérios	58
3.2.2	Avaliação dos critérios pelos especialistas	59
3.2.3	Ranqueamento dos Modelos de Maturidade	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1	Escolha do modelo a ser utilizado	61
4.1.1	Avaliação dos Critérios – Método AHP	62
4.1.2	Ranqueamento dos Modelos de Maturidade – Método Fuzzy TOPSIS	63
4.2	Aplicação do Modelo Escolhido	70
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE A - Protocolo de formação do portfólio dos modelos de maturidade	84
	APÊNDICE B - Modelos de Maturidade analisados.....	88
	APÊNDICE C – Análise dos Modelos de Maturidade sob a ótica dos critérios de avaliação	92
	APÊNDICE D – Modelo de Maturidade utilizado para avaliação.....	94

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresentam-se os seguintes tópicos: (i) contextualização do tema de pesquisa; (ii) o problema a ser estudado e observado; (iii) o objetivo geral e específicos na busca pela solução do problema; (iv) a justificativa da pesquisa; (v) os aspectos metodológicos; e, por fim, (vi) a delimitação da pesquisa.

1.1 Contextualização

Desde meados de 2010, o ambiente industrial vem mudando radicalmente devido a introdução de conceitos e tecnologias baseados na Quarta Revolução Industrial (SENDER, 2013). Um sinônimo para essa nova Revolução Industrial foi mencionado, pela primeira vez, na Feira de Hannover em 2011, chamada de 'Indústria 4.0', tendo seu foco na combinação de produção, tecnologias de informação e internet. Dessa forma, as mais novas Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) são combinadas na Indústria 4.0 com processos industriais tradicionais (BMBF, 2012).

Nos últimos anos, a competitividade global tem aumentado consideravelmente. Não basta apenas produzir mais rápido, mais barato e com qualidade superior aos concorrentes, defendendo a vantagem competitiva conquistada. É preciso introduzir novos tipos de estratégias de produção inovadoras e 'digitais' para manter a vantagem competitiva atual no longo prazo (WANKHEDE; VINODH, 2021). A Quarta Revolução Industrial deve se estender a toda a cadeia de produção e suprimentos e, não apenas, como nas Revoluções anteriores, ao processo de manufatura mecânica dos produtos e à organização do processo. O desenvolvimento da Indústria 4.0 deve contribuir para enfrentar os desafios globais, como sustentabilidade, eficiência de recursos e energia e fortalecer a competitividade (KAGERMANN *et al.*, 2013).

Em todo o ciclo de vida da produção, a troca de dados deve ser aprimorada, trazendo vantagens para todas as partes envolvidas. Mais funcionalidades e opções de customização são obtidas para o cliente e mais flexibilidade, transparência e globalização para a cadeia de suprimentos (BAUM, 2013). Além disso, o retorno à singularidade deve ser alcançado pela quarta revolução industrial (OZTEMEL; GURSEV, 2020). Portanto, para permanecer competitivo, a capacidade de responder

aos requisitos do clientes de forma rápida e flexível e de produzir elevadas versões em lotes pequenos deve aumentar (MITTAL *et al.*, 2020).

A Indústria 4.0 visa implementar processos de manufatura altamente eficientes e automatizados, geralmente conhecidos pela produção em massa, também em um ambiente industrial, onde produtos específicos e individuais do cliente são fabricados de acordo com estratégias de customização em massa (MODRAK; MARTON; BEDNAR, 2014). Customização em massa significa a produção de produtos adequados às necessidades específicas dos clientes, com custos de produção semelhantes aos produtos fabricados em massa. Uma produção, com base no princípio da Indústria 4.0, cria as condições para substituir estruturas tradicionais, baseadas em mecanismos centralizados de tomada de decisão e limites rígidos de etapas individuais de valor agregado. Essas estruturas são substituídas por sistemas reconfiguráveis de manufatura e logística flexíveis, oferecendo mecanismos interativos e colaborativos de tomada de decisão (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016).

Nos últimos anos, um número crescente de autores abordou o tópico da Indústria 4.0 para Pequenas e Médias Empresas (PMEs) em seus trabalhos científicos (CENTEA *et al.*, 2020; PIROLA; CIMINI; PINTO, 2019; RAUCH *et al.*, 2020; TÜRKEŞ *et al.*, 2019). Graças a sua flexibilidade, espírito empreendedor e capacidade de inovação, as PMEs provaram, em muitos casos, serem mais robustas do que as grandes empresas, como mostrou a crise financeira e econômica anterior (MATT; RAUCH; FRACCAROLI, 2016). Normalmente, as PMEs não são apenas adaptativas e inovadoras em termos de seus produtos, mas, também, em termos de suas práticas de fabricação. Reconhecendo as contínuas pressões competitivas, as pequenas organizações estão se tornando cada vez mais proativas na melhoria de suas operações de negócios (MÜLLER; BULIGA; VOIGT, 2021), o que é um bom ponto de partida para a introdução de novos conceitos, como a Indústria 4.0.

A implementação bem-sucedida da Indústria 4.0 deve ocorrer não apenas nas grandes empresas, mas, em particular, nas PMEs (SOMMER, 2015). Vários estudos apontam mudanças relevantes e potencial para as PMEs no contexto da Indústria 4.0 (MOEUF *et al.*, 2018). As tecnologias da Indústria 4.0 oferecem grandes oportunidades para as PMEs aumentarem sua competitividade, e elas têm mais probabilidade de serem as grandes ganhadoras dessa mudança. Muitas vezes são capazes de implementar a transformação digital mais rapidamente do que as grandes empresas, porque podem desenvolver e implementar novas estruturas de TI do zero

com mais facilidade (DELOITTE, 2015). Muitas PMEs já estão focando em produtos digitalizados para se destacar no mercado (AMARAL; PEÇAS, 2021). A integração da tecnologia de informação e comunicação (TIC) e as tecnologias modernas da Indústria 4.0 estão transformando as fábricas de hoje em fábricas inteligentes com potencial econômico significativo (GUALTIERI *et al.*, 2019).

A Indústria 4.0 representa um grande desafio para as empresas em geral e para as PMEs em particular. A prontidão das PMEs aos conceitos da Indústria 4.0 e a capacidade organizacional das PMEs para enfrentar estes desafios existem apenas parcialmente. Quanto menores as PMEs, maior o risco de não poderem se beneficiar dessa Revolução. As PMEs brasileiras estão conscientes dos seus déficits de adaptação, e isso gera a necessidade de mais pesquisas e planos de ação para preparar as PMEs em uma direção técnica e organizacional (SOMMER, 2015). Atualmente, a maioria das PMEs não está preparada para implementar os conceitos da Indústria 4.0 (BRETTEL *et al.*, 2014; ORZES *et al.*, 2019).

Muitas empresas enfrentam o desafio de avaliar a diversidade de desenvolvimentos e conceitos sob o termo Indústria 4.0 e desenvolver suas próprias estratégias corporativas (NICK *et al.*, 2021). As PMEs tentam remodelar suas operações de acordo com tecnologias emergentes, com o objetivo de permanecerem competitivas e garantir a continuidade no mercado. Como a Indústria 4.0 está nos estágios iniciais de seu desenvolvimento, a definição da estrutura e a metodologia das diretrizes de implantação se torna essencial (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Sendo assim, há uma demanda em ajudar as organizações que estão fazendo essa transição para o novo ambiente industrial, assim como orientá-las para a melhor utilização de seus recursos.

Abordagens estruturadas, como modelos de maturidade (MM) ou estruturas de apoio, têm por objetivo ajudar as organizações, fornecendo orientações abrangentes e permitindo avaliar um roteiro adequado de implementação sustentável das novas tecnologias do novo paradigma. A noção de maturidade é usada para definir, avaliar e formar uma diretriz e uma base para mensurar a evolução nos negócios, ou seja, a maturidade de um processo ou de uma tecnologia (MENDES JR.; LEAL; THOMÉ, 2016). A ideia principal para a utilização de MMs é descrever o nível de aderência de uma organização, como um novo modelo de negócio empregado ou um novo processo desenvolvido. Outra suposição para o uso de MMs é que à medida que o grau de maturidade se torna maior, um progresso melhor é alcançado em

aspectos diferentes que contribuem para a evolução da organização. Sendo assim, o modelo de maturidade é considerado como uma linha de base deste estudo.

Em função da diversidade de MMs disponíveis atualmente com relação à Indústria 4.0, torna-se importante o desenvolvimento de um instrumento para auxiliar na escolha do modelo voltado as PMEs. Isso pode auxiliar a superar as barreiras encontradas quando comparadas às grandes organizações, contribuindo para que possam atuar de forma organizada e avancarem, buscando tecnologias, integração, adaptabilidade, agilidade, qualidade, flexibilidade e sustentabilidade. Desta maneira, busca-se criar um instrumento que auxilie as PMEs no processo de escolha do MM que auxilie no desenvolvimento estruturado e efetivo das organizações rumo à Indústria 4.0.

1.2 Problema de Pesquisa

O problema de pesquisa envolve as seguintes questões:

- Os modelos de maturidade atualmente disponíveis no contexto da Indústria 4.0 atendem as necessidades das PMEs?
- Como analisar a maturidade de uma PME diante dos MMs voltados para Indústria 4.0 de acordo com as especificidades de cada Organização?

1.3 Objetivos da Pesquisa

Nas seções a seguir, apresentam-se o objetivo geral e os objetivos específicos. Estes serão norteadores da pesquisa, a fim trazer respostas ao problema proposto.

1.3.1 Objetivo geral

Propor e aplicar um *framework* que auxilie as PMEs na escolha do modelo de maturidade para avaliar o estágio atual de maturidade em Indústria 4.0, e que as auxilie na aplicação de estratégias de implementação das tecnologias 4.0.

1.3.2 Objetivos específicos

- I. Identificar, na literatura, modelos de avaliação da maturidade voltados para a Indústria 4.0;
- II. Testar o *framework* proposto no contexto de uma indústria do setor de alumínio;
- III. Diagnosticar o estágio atual de maturidade com base no modelo escolhido;
- IV. Identificação de pontos críticos da empresa avaliada para consecução de patamares mais elevados de maturidade.

1.4 Justificativa

O tema da Indústria 4.0 tem despertado grande interesse não apenas no âmbito econômico, mas, também, acadêmico e social, tendo em vista o número crescente de publicações a partir de 2011. Muito desse interesse deve-se em função das melhorias nas organizações através do aumento na qualidade e produtividade. Esses fatores levam a uma redução de custos e maior retorno financeiro, implicando também em aspectos sociais, em função da preocupação da comunidade especialmente em relação as mudanças no mercado de trabalho.

Posada *et al.* (2015), Wang *et al.* (2016) e Liao *et al.* (2017) enfatizam a importância acadêmica do presente tema. Na área econômica, destacam-se os volumes de investimentos que estão sendo realizados por diversos países, e na área social a importância se dá em função do impacto na geração de emprego e renda da população.

No tocante às organizações, De Carolis *et al.* (2017) destacam o grande número de modelos de maturidade atualmente disponíveis, o que torna mais difícil a identificação do modelo ideal para atendimento das necessidades das PMEs, que seja capaz de auxiliá-las no desenvolvimento e avanço da manufatura inteligente. Os modelos disponíveis atualmente não abordam de forma específica as pequenas e médias organizações. Estas, com suas particularidades, necessitam de um modelo que seja capaz de diagnosticar o nível de maturidade em que estão, de forma mais assertiva, e de acordo com o contexto em que estão inseridas. Desta forma, torna-se pertinente a presente pesquisa neste tema, uma vez que permitirá atuar em uma importante lacuna que, segundo Schumacher, Erol e Sihn (2016) relaciona-se à identificação da situação atual das PMEs no contexto da Indústria 4.0 para que possam evoluir em seus processos.

Para corroborar com a lacuna existente, (GÖKALP; ŞENER; EREN, 2017); apontam as dificuldades quanto ao desenvolvimento de um modelo para Indústria 4.0. Thoben, Wiesner e Wuest (2017) afirmam que diferentes áreas estão relacionadas, tais como: Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Logística dentre outras.

Com isso, o presente trabalho pretende, por meio do tema proposto, contribuir nos âmbitos acadêmico, econômico e social. No âmbito acadêmico, por meio da identificação dos principais pilares da Indústria 4.0, identificação quanto aos modelos de maturidade já existentes na indústria 4.0 que atendam as demandas das PMEs, bem como os pontos a serem melhorados. Com isso, busca-se propor um *framework* para auxiliar as PMEs no desenvolvimento e avanço de seus processos.

No âmbito econômico, com o estímulo à visibilidade das PMEs no contexto da Indústria 4.0 a partir de conceitos multiáreas e multidisciplinares da Indústria 4.0, estimulando o avanço de melhorias de produtividade, flexibilidade, qualidade, redução de tempo e custo, ganhos financeiros e demais melhorias apontadas nos conceitos da Indústria 4.0.

Já no contexto social, a contribuição será através da explanação sobre as melhorias da Indústria 4.0 para a sociedade a partir dos conceitos apontados, e preparação aos trabalhadores a partir dos níveis de maturidade em indústrias no conceito da Indústria 4.0.

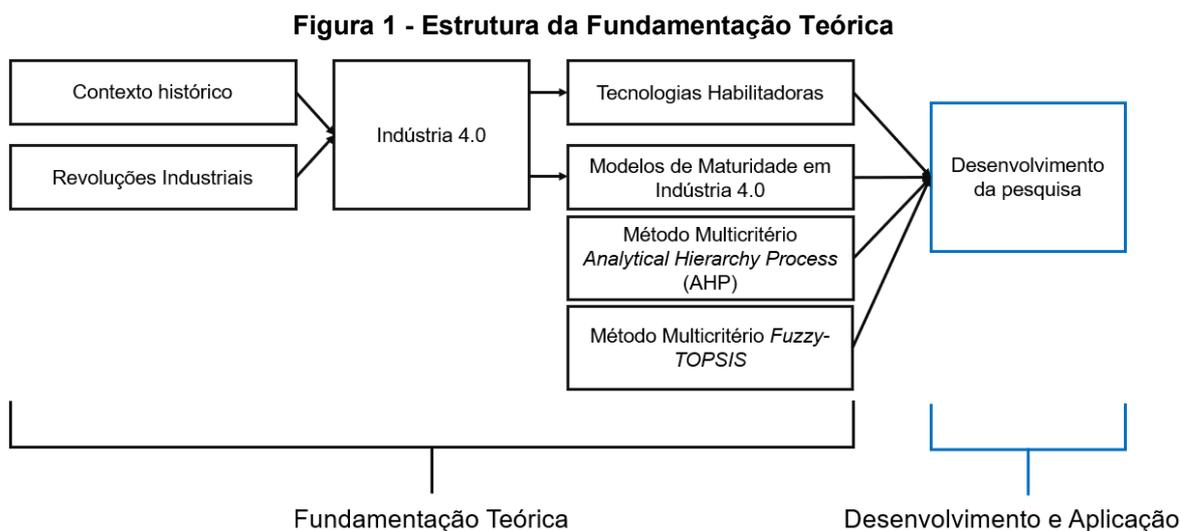
1.5 Metodologia de desenvolvimento da dissertação

Quanto à natureza, esta pesquisa pode ser classificada como aplicada, pois, de acordo com Turrioni e Mello (2012), a pesquisa bibliográfica ou a revisão de literatura constitui o projeto de pesquisa, que não pode deixar de lado nenhuma obra importante para o tema específico. Além disso, a abordagem é exploratória, possuindo duas fases: a qualitativa e a quantitativa. Quanto a abordagem qualitativa, refere-se a explorar o tema de pesquisa para auxiliar na fase quantitativa (MIGUEL, 2007).

Quanto ao método de pesquisa, pode ser classificada como pesquisa aplicada, pois tem como abordagem o interesse prático, ou seja, que os resultados sejam aplicados ou utilizados para solucionar problemas que ocorrem na realidade (TURRIONI; MELLO, 2012). Além disso, pretende-se fornecer uma ferramenta que auxilie as PMEs na escolha de uma ferramenta de avaliação do estado atual da Indústria diante do cenário da Indústria 4.0.

Quanto a coleta de dados, segundo Turrioni e Mello (2012, p.41), “A pesquisa descritiva “delineia o que é” e visa descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis”. Desta forma, a pesquisa pode ser classificada como descritiva, pois foram realizadas buscas com palavras-chave através de combinações, com o objetivo de desenvolver um modelo completo e estruturado voltado as PMEs. Nesse sentido, buscou-se fundamentos teóricos, objetivando compreender a Indústria 4.0 e seus componentes, bem como os modelos de maturidade atualmente disponíveis, para desenvolver um *framework* que atenda as PMEs na jornada rumo à Indústria 4.0.

Com base na classificação da pesquisa e a fim de alcançar os objetivos estabelecidos, utilizou-se o procedimento metodológico conforme descrito a seguir. A primeira etapa do estudo consistiu no planejamento da pesquisa. Identificou-se o problema de pesquisa, os seus limites de atuação e realizou-se o levantamento bibliográfico dos temas relacionados à Indústria 4.0. Com isso, foi possível definir os objetivos da pesquisa e os tópicos que compõe o esqueleto da fundamentação teórica discutida no próximo capítulo, conforme apresentado na Figura 1.

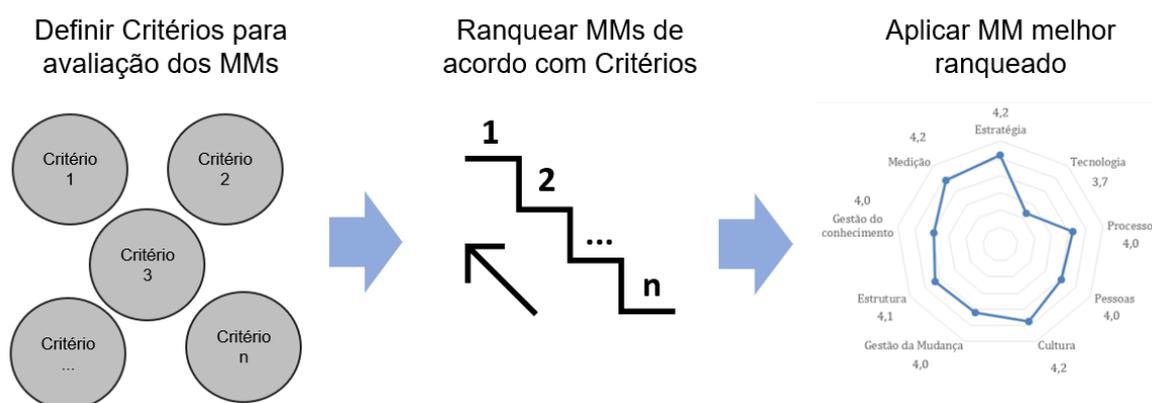


Fonte: Autoria própria (2022).

Para o desenvolvimento da pesquisa, o primeiro passo consistiu em definir os critérios utilizados para avaliação dos modelos de maturidade da Indústria 4.0. A partir dos critérios levantados, passou-se para etapa de avaliação de importância dos critérios, obtidos com análise multicritério por meio do método *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Após essa avaliação, foi possível avaliar os modelos de maturidade

levantados na revisão bibliográfica, por meio do método de análise multicritério *Fuzzy-TOPSIS*. Como resultado, foi possível ranquear os modelos de maturidade disponíveis no portfólio, sendo que o modelo melhor ranqueado foi utilizado para avaliação do nível de maturidade em uma organização para identificação do estado de maturidade atual. Por se tratar de uma avaliação dinâmica, tanto a avaliação dos critérios quanto o MM melhor ranqueado poderão sofrer alteração de acordo com os avaliadores. A Figura 2 sintetiza o processo de desenvolvimento da pesquisa e apresenta de forma genérica o resultado da aplicação de um MM com nove dimensões que não retrata este estudo.

Figura 2 - Estrutura de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2022).

1.6 Estrutura da dissertação

Para a realização desta pesquisa, optou-se pela breve contextualização das Revoluções Industriais, com maior enfoque na Indústria 4.0. Complementarmente, passou-se para a discussão dos MMs atualmente disponíveis, identificando suas principais características e, em seguida, discorreu-se sobre o método multicritério que será utilizado em nossa pesquisa. Deste modo, obteve-se subsídios para a próxima etapa, de desenvolvimento de um *framework* que apoiasse as PMEs na avaliação de maturidade dentro de seus processos industriais, afim de garantir de forma organizada o desenvolvimento estruturado rumo à jornada 4.0. Os capítulos são explanados de maneira mais detalhada a seguir.

No Capítulo 1 são apresentadas a contextualização do tema de pesquisa, o problema de pesquisa, os objetivos bem como as justificativas para o desenvolvimento

da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica onde serão abordados os temas pertinentes à pesquisa. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada, e no Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões. Por fim, no Capítulo 5 tem-se a conclusão e trabalhos futuros propostos, formulados com base no produto final desenvolvido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O início deste capítulo visa explicar as características da Indústria 4.0, seu contexto histórico e componentes. Em seguida, serão abordados os modelos de maturidade disponíveis no contexto da Indústria 4.0, além de uma revisão crítica dos modelos estudados. Finaliza-se com a análise das PMEs no contexto da Indústria 4.0, com o objetivo de auxiliar no desenvolvimento da pesquisa.

2.1 Indústria 4.0

Alguns estudiosos e profissionais consideram quatro principais mudanças na indústria ao longo da história, sendo a Indústria 4.0 (mais recente) uma transformação contínua da indústria (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016). A Primeira Revolução Industrial está relacionada com a utilização das máquinas à vapor no final do século XVIII. A Segunda, envolveu a utilização da eletricidade em processos industriais no final do século XIX, e foi predominantemente originada por mudanças organizacionais, como a implementação da linha de montagem de Henry Ford e os procedimentos de gestão científica destacados por Frederic W. Taylor, mais conhecido como taylorismo (ELMARAGHY, 2019). A Terceira Revolução Industrial começou por volta de 1969, caracterizada pela implementação de tecnologias de informação e comunicação (TIC) e automação industrial. Com a Terceira revolução industrial, a automação na indústria foi aprimorada pelo emprego de sistemas inteligentes como a robótica industrial e os domínios de mecatrônica e robótica inteligentes (KUNII, 1997).

A Quarta Revolução Industrial – conhecida como Indústria 4.0 – foi consolidada em uma iniciativa público-privada alemã para construir fábricas inteligentes através da integração de objetos físicos com tecnologias digitais (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016). O principal elemento que marca essa nova era industrial é a mudança profunda na conectividade dos sistemas de manufatura pelo uso das TICs, Internet das Coisas (IoT) e máquinas em sistemas ciber-físicos (CPS) (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; SCHWAB, 2017). Como resultado dessa integração, a Indústria 4.0 pode ser considerada como uma era industrial baseada nas plataformas de conectividade utilizadas na Indústria (REISCHAUER, 2018). Considera a integração de várias dimensões diferentes do negócio, com uma preocupação principal em questões de manufatura, baseadas em tecnologias

avançadas de fabricação (FATORACHIAN; KAZEMI, 2018a). Nesse sentido, a Indústria 4.0 pode ser interpretada como um resultado crescente da digitalização das empresas, especialmente no que diz respeito aos processos de fabricação (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016).

A Indústria 4.0 tem como alvo a implementação de estruturas e processos interconectados, inteligentes e autocontrolados de processos e sistemas (WANKHEDE; VINODH, 2021). Portanto, os processos de negócios baseados em suas tecnologias subjacentes fornecem processos inovadores de valor agregado, proporcionando operações mais flexíveis, confiáveis e eficientes. Em geral, os últimos desenvolvimentos em tecnologia por si só oferecem novas oportunidades e criam novos modelos de negócios, enquanto a Indústria 4.0 é vista como um desenvolvimento tecnológico disruptivo que traz uma inovação no novo modelo de negócio no setor manufatureiro (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Como ainda está em fase inicial de desenvolvimento, é essencial definir a estrutura e a metodologia das diretrizes de implementação da Indústria 4.0 nas organizações para que esse processo seja bem-sucedido.

2.2 Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0

Como a Indústria 4.0 abrange muitas tecnologias, algumas delas se sobrepõem em termos de funcionalidades e capacidades que oferecem. As tecnologias essenciais, também conhecidas como tecnologias de base ou habilitadoras, que são empregadas no contexto da Indústria 4.0 são as seguintes: sistemas cyber-físicos (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016); *Big Data* (SCHMIDT *et al.*, 2015; XIONG *et al.*, 2015); IoT (ALQAHTANI; GUPTA; NAKASHIMA, 2019; XIONG *et al.*, 2015) e *Cloud Computing* (SCHMIDT *et al.*, 2015; XIONG *et al.*, 2015). A seguir, apresenta-se mais detalhes de cada tecnologia.

2.2.1 Sistemas cyber-físicos (CPS)

Termo cunhado por Helen Gill em 2006, enquanto Diretora do Programa de Sistemas Embarcados e Híbridos da Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos, significa sistemas físicos e sistemas cibernéticos combinados (LEE, 2015). A Indústria 4.0 fundamenta-se com o CPS, que tem o papel de monitorar, analisar e

automatizar os processos de manufatura nas indústrias, sendo uma transformação para a produção e demais processos industriais. Por definição, o CPS se destina a fornecer um ambiente virtual que incorpora uma rede de interação de elementos do sistema com entradas e saídas físicas em ambas as extremidades.

Segundo Wang *et al.* (2016a) e Thoben, Wiesner e Wuest (2017), o CPS é um sistema ainda em desenvolvimento, o que garante inúmeras possibilidades na implementação fabril. Tal sistema possui tecnologias emergentes como a IoT, *Big Data*, *Cloud Computing*, além de outros, possibilitando a interação homem-máquina.

O CPS pode ser utilizado nos mais diversos setores (HELLINGER; SEEGER, 2011; LEE, 2015). Na manufatura, engloba os elementos físicos – equipamentos, peças e produtos – que possuem uma representação virtual nos sistemas de produção (KAGERMANN *et al.*, 2013). O CPS é citado como o principal elemento das mudanças disruptivas da Indústria 4.0 (LEE, 2015). Segundo Posada *et al.* (2015b) e Kang *et al.* (2016), é caracterizado por possuir máquinas inteligentes, sistema de armazenagem e um sistema de produção que possui trocas de informações de forma autônoma e inteligente. Tratam-se de entidades computacionais que possuem uma conexão intensa com o mundo físico, fornecendo em tempo real os dados via internet referentes aos serviços, processos e a produção em massa, tendo como uma das principais vantagens a eficiência e a flexibilidade na agilidade de tomar decisões.

Os CPS são arquiteturas complexas em que entidades físicas ou processos são controlados remotamente por componentes cibernéticos. Esses componentes são responsáveis por realizar a configuração das capacidades de comunicação e das funções de processamento de dados. Surgiram com base no sistema de controle industrial, onde a aquisição de dados e elementos de processamento de um sistema de controle em rede são tradicionalmente organizados em níveis hierárquicos e aplicativos. Até o momento, o projeto de redes de automação industrial tem se baseado em um modelo de isolamento, onde o controle da tecnologia operacional é separado da perspectiva da tecnologia da informação. No entanto, apesar dos níveis mencionados anteriormente representarem uma arquitetura hierárquica, um CPS tende a ser projetado como uma rede conectando todos os elementos físicos e computacionais em uma infraestrutura de produção. Portanto, a importância dos CPS reside em uma integração total entre os processos de produção e as comunicações (MOLINA; JACOB, 2018).

A aplicação do CPS confere certa descentralização na tomada de decisões, permitindo que estas ocorram ao longo do processo, garantindo assim maior agilidade, estabilidade e flexibilidade no processo produtivo, possibilitando que uma decisão possa ser tomada em tempo real.

2.2.2 Big Data

O Nist (2015) define o termo *Big Data* como um enorme conjunto de dados em que a grande massa de dados não é estruturada e necessita de análise em tempo real. O termo trata da inabilidade das tradicionais arquiteturas de dados de manusear de forma eficiente uma grande quantidade de dados, sendo requerido uma arquitetura escalável para, de forma eficaz, armazenar, manipular e analisar dados. As características do *Big Data* implicam em uma nova arquitetura conhecida como “Vs” do *Big Data*, quais são:

- Volume – tamanho do conjunto de dados;
- Variedade – dados a partir de múltiplos repositórios, tipos ou domínios;
- Veracidade – coerência no conjunto de dados;
- Velocidade – taxa do fluxo de dados.

As definições de volumes de *Big Data* são relativas e variam por fatores, como tempo e tipo de dados. O que pode ser considerado *Big Data* hoje pode não atingir o limite no futuro, porque as capacidades de armazenamento aumentarão, permitindo que conjuntos de dados ainda maiores sejam capturados. Além disso, o tipo de dados, discutido em variedade, define o que se entende por 'grande'. Dois conjuntos de dados do mesmo tamanho podem exigir diferentes tecnologias de gerenciamento de dados com base em seu tipo, por exemplo dados tabulares versus dados de vídeo. Portanto, as definições de *Big Data* também dependem do setor. Logo, essas considerações tornam impraticável definir um limite específico para volumes de *Big Data* (GANDOMI; HAIDER, 2015).

Variedade se refere à heterogeneidade estrutural em um conjunto de dados. Os avanços tecnológicos permitem que as empresas usem vários tipos de dados estruturados, semiestruturados e não estruturados. Dados estruturados, que constituem apenas 5% de todos os dados existentes (CUKIER, 2010), referem-se aos dados tabulares encontrados em planilhas ou bancos de dados relacionais. Texto, imagens, áudio e vídeo são exemplos de dados não estruturados, que às vezes

carecem da organização estrutural exigida pelas máquinas para análise. Abrangendo um contínuo entre dados totalmente estruturados e não estruturados, o formato dos dados semiestruturados não obedece a padrões rígidos. *Extensible Markup Language* (XML), uma linguagem textual para troca de dados na Web, é um exemplo típico de dados semiestruturados. Os documentos XML contêm *tags* de dados definidos pelo usuário que os tornam legíveis por máquinas (GANDOMI; HAIDER, 2015).

Veracidade representa a falta de confiabilidade inerente a algumas fontes de dados. É o que permite uma análise de dados mais consistente e adequada, baseada em informações relevantes e, mais que isso, potencialmente utilizáveis para melhorar as operações das organizações.

Velocidade refere-se a taxa em que os dados são gerados e a rapidez em que devem ser analisados e implementados. A proliferação de dispositivos digitais, como *smartphones* e sensores, levou a uma taxa sem precedentes de criação de dados, e está levando a uma necessidade crescente de análises em tempo real e planejamento baseado em evidências. Os dados que emanam de dispositivos móveis, e fluem por meio de aplicativos móveis, produzem torrentes de informações que podem ser usadas para gerar ofertas personalizadas em tempo real para os clientes do dia a dia. Esses dados fornecem informações confiáveis sobre os clientes, como localização geoespacial, dados demográficos e padrões de compra anteriores, que podem ser analisados em tempo real para criar valor real para o cliente.

Em trabalhos mais recentes, pesquisadores utilizam o termo *Big Data Analytics*. O termo *Analytics* se refere a descoberta, interpretação e comunicação dos padrões significativos nos dados, tendo valor expressivo nas mais diversas áreas do conhecimento, pois pode-se aplicar a análise de dados no negócio afim de realizar previsões, melhorar o desempenho, gerenciar decisões, analisar riscos, aprimorar recursos dentre outros.

2.2.3 Internet das Coisas (IoT)

De modo geral, IoT se refere à interconexão em rede de objetos do cotidiano, que geralmente são equipados com inteligência onipresente. A IoT aumenta a onipresença da internet ao integrar todos os objetos para interação por meio de sistemas embarcados, o que leva a uma rede altamente distribuída de dispositivos que se comunicam com seres humanos e com outros dispositivos. Graças aos rápidos

avanços nas tecnologias subjacentes, a IoT está abrindo enormes oportunidades para muitos novos aplicativos que prometem melhorar a qualidade de vida. Nos últimos anos, a IoT ganhou muita atenção de pesquisadores e profissionais de todo o mundo (XIA *et al.*, 2012).

Os usos da tecnologia IoT são diferentes porque podem ser aplicadas a quase qualquer tecnologia e podem fornecer conhecimento sobre o processo de intervenção, desempenho da operação e as variáveis ambientais que devem ser controladas e monitoradas à distância. Atualmente, várias organizações em diferentes setores e indústrias usam essa tecnologia para minimizar, criar, automatizar e rastrear diversos processos (SADEEQ *et al.*, 2021).

A identificação por radiofrequência (RFID) é vista como um dos principais facilitadores da IoT, pois os objetos devem ser identificados para que possam ser conectados. A RFID, que usa ondas de rádio para identificar itens, pode fornecer esta função. Às vezes, a RFID é rotulado como um substituto do código de barras, mas na realidade pode fazer muito mais do que isso. Além de identificar itens, ela também pode rastrear itens em tempo real para obter informações importantes sobre sua localização e status. RFID já teve algumas aplicações valiosas no varejo, assistência médica, gerenciamento de instalações (LEGNER; THIESSE, 2006), etc. Uma tecnologia RFID madura fornece um forte suporte para a IoT.

Um dos maiores avanços da IoT é fazer o mundo físico e o mundo da informação juntos. Os sensores desempenham um papel muito importante para preencher a lacuna entre o mundo físico e o mundo da informação. Os sensores coletam dados de seu ambiente, gerando informações e aumentando a conscientização sobre o contexto. Assim, a mudança de seu ambiente pode ser monitorada e as “coisas” correspondentes podem dar algumas respostas, se necessário (TAN; WANG, 2010).

Para Roblek, Meško e Krapež (2016), por meio da integração das tecnologias CPS, IoT e IoS (*Internet of Service*), desencadeou-se diversas mudanças no comportamento dos consumidores, tais como produtos personalizados, empresas com contato direto com o cliente, prestação de serviço por aplicativo, dentre outros. Além disso, Roblek, Meško e Krapež (2016), afirmam que as organizações precisam entender que a tecnologia pode auxiliá-los na identificação de opiniões e de fatores que possam influenciar na tomada de decisão de um cliente referente a aquisição de um produto.

2.2.4 Computação em nuvem

A computação em nuvem, também conhecida como *Cloud Computing*, está mudando a maneira como os setores e empresas fazem negócios, pois os recursos dinamicamente escaláveis e virtualizados são fornecidos como um serviço pela internet. O principal objetivo da computação em nuvem é fornecer serviços de computação sob demanda com alta confiabilidade, escalabilidade e disponibilidade em um ambiente distribuído (XU, 2012).

Na computação em nuvem, tudo é tratado como um serviço, por exemplo, SaaS (*Software as a Service*), PaaS (*Platform as a Service*) e IaaS (*Infrastructure as a Service*). Esses serviços definem uma estrutura de sistema em camadas para computação em nuvem. Nas camadas de infraestrutura, processamento e armazenamento, redes e outros recursos de computação fundamentais são definidos como serviços padronizados pela rede. A camada intermediária, PaaS, fornece abstrações e serviços para desenvolver, testar, implantar, hospedar e manter aplicativos no ambiente de desenvolvimento integrado. A camada de aplicativo fornece um conjunto completo de aplicativos de SaaS. A camada de interface do usuário (a parte superior) permite uma interação contínua com todas as camadas XaaS subjacentes (PALLIS, 2010).

A computação em nuvem está mudando rapidamente as organizações convencionais. Com a Indústria 4.0, as indústrias de manufatura estão caminhando com as novas práticas de negócios ágeis, escaláveis e eficientes, substituindo os modelos de negócios de manufatura tradicionais por aqueles baseados em arquitetura em nuvem. Os benefícios na adoção da computação em nuvem em empresas de manufatura podem ser múltiplos. Desde a economia obtida com a eliminação de algumas das funções essenciais da TI, passando por personalizações e ajustes que a empresa necessita em nível de processo que podem ser realizados pela TI.

Normalmente, algumas partes da empresa podem adotar soluções baseadas em nuvem de forma rápida e fácil, enquanto outras áreas permanecem no modelo tradicional. Desta forma, exige-se um mecanismo inteligente para lidar com a integração destes processos.

2.3 Modelos de maturidade da Indústria 4.0

Um modelo de maturidade pode ser definido como uma estrutura conceitual, constituída por partes que definem a maturidade, ou o estado de desenvolvimento, de uma determinada área de interesse, e em alguns casos identifica e descreve processos que uma organização precisa desenvolver para atingir um determinado cenário futuro desejado (SANTOS; MARTINHO, 2019). Modelos de maturidade refletem aspectos da realidade para classificar capacidades de determinados domínios de interesse, que podem ser usados para análises, comparações com competidores, e comparações com as referências naquele domínio (*benchmarking*) (SAAD; BAHADORI; JAFARNEJAD, 2021).

Estes modelos tipicamente contemplam dimensões e níveis. O conteúdo de cada dimensão pode ser derivado de métodos qualitativos de pesquisa, incluindo estudos de caso, grupos focais, e outras metodologias de geração de ideias e tomada de decisão (BRUTON *et al.*, 2016). Os níveis são rótulos ordinais que significam estágios de maturidade, enquanto as dimensões representam capacidades específicas do domínio de interesse. Um nível de maturidade consiste na consolidação de práticas gerais e específicas relacionadas a um conjunto de processos predefinidos que aumentam a performance geral de uma empresa, ou de um objetivo específico (SOUZA; GOMES, 2015).

A transformação para a Indústria 4.0 envolve um aumento significativo das competências digitais na manufatura, e provoca mudanças ao longo de toda a organização. Considerando a alta complexidade desta transformação, é esperado que leve muitos anos, e deva ser planejada e implementada de modo a garantir impactos positivos na lucratividade, por exemplo através de ganhos de eficiência e em etapas incrementais. Pode não ser exatamente sincronizada em todos os processos de negócio, plantas industriais, linhas de produção, ou mesmo em todas as células de produção em uma unidade. Fica a critério de cada empresa decidir qual estágio de desenvolvimento representa um bom equilíbrio entre os custos e os benefícios da mudança, de acordo com as circunstâncias que envolvem o negócio, com a visão de um estado futuro desejado ao final do processo de transformação (SCHUH *et al.*, 2017a).

Antes de engajarem-se em projetos ou atividades de transformação, as empresas de manufatura precisam reconhecer o estado atual de aderência aos

conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. Entende-se que isso deve ocorrer por meio de uma análise sistemática e estratégica, que envolva não somente o desempenho da empresa em si, mas de todas as partes envolvidas no negócio, tais como fornecedores, clientes e investidores. Desta forma, serão apresentados e analisados alguns dos modelos que avaliam a maturidade na Indústria 4.0, disponíveis na literatura recente. Cabe ressaltar que os artigos foram escolhidos conforme sua relevância sobre o tema, e a metodologia utilizada na pesquisa encontra-se disponível no Apêndice 1. A partir da pesquisa bibliográfica, foram estudados os modelos de maturidade da Indústria 4.0, com objetivo de conhecer o que existe na literatura, e para fundamentar o desenvolvimento do *framework* que auxilie as PMEs na jornada 4.0. O Quadro 1 apresenta os artigos avaliados por ordem de relevância.

Quadro 1 - Artigos e seus respectivos periódicos

Artigo	Autores	Periódico	Ano
<i>Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice</i>	<i>Wagire et al.</i>	<i>Production Planning & Control</i>	2020
<i>An Industry 4.0 maturity model proposal</i>	<i>Santos e Martinho</i>	<i>Journal of Manufacturing Technology Management</i>	2019
<i>A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era</i>	<i>Colli et al.</i>	<i>Annual Reviews in Control</i>	2019
<i>Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defense sector</i>	<i>Bibby e Dehe</i>	<i>Production Planning & Control</i>	2018
<i>Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0</i>	<i>Ganzarain e Errasti</i>	<i>Journal of Industrial Engineering and Management</i>	2016
<i>Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains</i>	<i>Asdecker e Felch</i>	<i>Journal of Modeling in Management</i>	2018
<i>A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management</i>	<i>Caiado et al.</i>	<i>International Journal of Production Economics</i>	2020
<i>A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises</i>	<i>Rauch et al.,</i>	<i>Sustainability</i>	2020
<i>An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies</i>	<i>Rafael et al.,</i>	<i>Technological Forecasting & Social Change</i>	2020
<i>Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research</i>	<i>Pirola, Cimini e Pinto</i>	<i>Journal of Manufacturing Technology Management</i>	2019

Fonte: Autoria própria (2022).

2.3.1 Modelo 1: Desenvolvimento de modelo de maturidade para avaliação da implementação da indústria 4.0: teoria e prática de aprendizagem

O estudo de Wagire *et al.* (2020) apresenta um modelo de maturidade com uma estrutura de avaliação para apoiar as organizações na identificação de sua situação entre a tecnologia da informação e a tecnologia operacional, e sugere as áreas de melhoria em direção à jornada da Indústria 4.0. A estrutura consiste em um modelo com 38 itens de medição categorizados em diferentes níveis de importância em organizações, pessoas e tecnologia, distribuídos em sete dimensões: “Pessoas e Cultura”, “Conscientização da Indústria 4.0”, “Estratégia Organizacional”, “Cadeia de Valor e Processos”, “Tecnologia de Manufatura Inteligente”, “Tecnologia Orientada a Produtos e Serviços” e “Tecnologia de Base da Indústria 4.0”. Os itens e dimensões de maturidade são priorizados com base em seus níveis de importância calculados por meio do *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP). O modelo foi testado, validado e implementado em cinco empresas manufatureiras indianas, das quais um caso da indústria de manufatura de componentes automotivos foi apresentado no estudo.

O foco principal do modelo de maturidade está nas tecnologias emergentes, bem como nos aspectos críticos das organizações, como estratégias, pessoas e cultura, consciência sobre o conceito, utilidade e sensibilidade para a transformação da Indústria 4.0. Os 38 itens de medição incluídos em cada dimensão de avaliação foram derivados de estudos anteriores e reconhecidos com a ajuda de especialistas na área.

O modelo propõe a utilização de quatro níveis de maturidade. O nível de Maturidade 1 pode ser descrito como “*Outsider*”, no qual as empresas não têm exposição a quaisquer aspectos da Indústria 4.0, planos mínimos ou atividades de implementação para a realização da Indústria 4.0. Por outro lado, o nível de maturidade mais alto (4) descreve a maturidade “Especialista” para aquelas empresas que adotaram com sucesso todos os aspectos da Indústria 4.0 e têm a aplicação intensa de tecnologias emergentes. Os outros níveis de maturidade entre o nível 1 e o nível 4 são indicados da seguinte forma: o nível 2 designa a empresa como “Iniciante Digital” e o nível 3 representa o estado de maturidade “Experiente”.

O modelo de maturidade foi testado e validado em cinco organizações de diferentes setores de manufatura, como automotivo, alimentos e bebidas e empresas de manufatura de equipamentos elétricos e eletrônicos para verificar sua estrutura e

adequação ao domínio. O estudo apresenta apenas um caso e justifica a análise em função do setor automotivo indiano se encontrar no auge de inovações tecnológicas como eletrificação, conectividade e autonomia bem como o fato de o setor contribuir com cerca de 7,5% para o Produto Interno Bruto da Índia (“IBEF”, 2019).

Como limitações apresentadas, os autores ressaltam que o julgamento e a opinião dos especialistas envolvidos no processo contêm um certo nível de subjetividade, que o modelo precisa ser testado quanto à sua aplicabilidade com o objetivo de generalizá-lo em outras organizações e setores industriais. Além disso, uma pesquisa em escala maior pode ser realizada para reconhecer o nível de importância dos itens de maturidade para organizações de diferentes setores e itens relacionados a questões legais e regulatórias poderiam ser introduzidos no modelo.

2.3.2 Modelo 2: Uma proposta do modelo de maturidade da Indústria 4.0

Santos e Martinho (2019) desenvolveram um modelo de maturidade para avaliar a implementação de conceitos e tecnologias relacionados à Indústria 4.0 que podem ser aplicados em empresas industriais e de serviços. O objetivo é que essas empresas possam identificar o estágio atual de maturidade, revelar as causas de não atingimento da maturidade desejada, e acompanhar o desenvolvimento de ações que potencializem suas capacidades técnicas e gerenciais.

Os autores citam quatro elementos-chave chamados de: (i) dimensões, (ii) capacidades de transformação, (iii) níveis de maturidade, (iv) instrumento de medição. Os elementos dimensões e capacidades de transformação são chamados de componentes e subcomponentes, respectivamente.

As dimensões (componentes) são multidisciplinares e podem ser entendidas como fatores de agrupamento das capacidades de transformação (subcomponentes). O modelo apresenta cinco dimensões relacionadas às questões organizacionais, de gestão e questões técnicas. São elas: Estratégia, Estrutura e Cultura organizacional, Trabalhadores, Fábricas inteligentes, Processos inteligentes e Produtos e serviços inteligentes.

As capacidades de transformação (subcomponentes) são os itens de avaliação que recebem uma classificação mensurável de maturidade. Com relação aos níveis de maturidade, o modelo proposto apresenta seis níveis de maturidade que estão descritos abaixo:

- Nível 0 - baixo ou nenhum grau de implementação.
- Nível 1 - ações piloto em planejamento ou em desenvolvimento.
- Nível 2 - implementação das ações iniciadas, com alguns benefícios sendo observados.
- Nível 3 - implementação parcial de ações, que aumentem a competitividade da empresa.
- Nível 4 - implementação avançada de ações, com retorno econômico claro.
- Nível 5 - referência na aplicação dos conceitos e implementação das tecnologias de Indústria 4.0.

A forma de avaliação se dá através de um questionário, usado para estabelecer o nível de maturidade das capacidades de transformação com mais precisão. O critério utilizado no modelo para classificar a maturidade de uma dimensão foi a média das respectivas capacidades de transformação e para a avaliação global da empresa foi utilizado a média dos níveis das dimensões.

O modelo foi validado e testado em duas empresas brasileiras da indústria automotiva. Como limitação de pesquisa, os autores citam o pequeno número de profissionais que participaram de validação do modelo.

2.3.3 Modelo 3: uma abordagem de avaliação de maturidade para conceber *roadmaps* específicos de contexto na indústria 4.0

O modelo desenvolvido por Colli *et al.* (2019) propõe uma abordagem de avaliação destinada para a operacionalização de uma avaliação da maturidade digital, que visa subsidiar a contextualização de seu resultado com o objetivo de possibilitar ao avaliador adequar as recomendações de melhoria às necessidades específicas da empresa. Consiste em uma abordagem de aprendizagem baseada no modelo *Problem Based Learning* (PBL). O modelo PBL foi escolhido devido à sua ancoragem teórica ao conceito de zona próxima de desenvolvimento (VYGOTSKY, 1980) e, portanto, ao conceito de maturidade. Além disso, o modelo PBL se encaixa particularmente bem em contextos caracterizados por problemas complexos “que não têm uma única resposta correta” (HMELO-SILVER, 2004).

Os autores adaptaram o modelo de maturidade da Acatech desenvolvido por Schuh *et al.* (2017b). Os níveis de maturidade e dimensão do modelo Acatech foram

traduzidos, portanto, em um novo modelo. Em relação aos estágios de maturidade, um estágio adicional, “nenhum”, foi adicionado ao modelo devido à necessidade de um estágio “nível zero” (identificado por Mittall *et al.* (2018)), a fim de inserir no caminho da evolução empresas que ainda não iniciaram o processo de transformação digital. O estágio de "informatização" foi renomeado como "básico" e os estágios de "conectividade", "visibilidade" e "transparência" foram agrupados em um estágio "transparente", pois os autores consideraram os estágios semelhantes. Um "informado" está substituindo a "capacidade preditiva" a fim de fornecer um rótulo mais genérico para as capacidades relacionadas, ou seja, análise e interpretação. Pelo mesmo motivo, o estágio de “adaptabilidade” foi renomeado como “autônomo”. Uma etapa “integrada” foi adicionada de forma a incluir, como objetivo final, a visão da Indústria 4.0 que consiste em uma rede de abastecimento integrada (JESCHKE *et al.*, 2017). Os níveis de maturidade consistem, portanto, em seis estágios sequenciais: nenhum, básico, transparente, informado, autônomo e integrado.

As dimensões, após adaptação foram definidas conforme descrito abaixo:

Governança: nível organizacional (por exemplo, estratégia e plano, estrutura organizacional, gestão de projetos, alocação de recursos, consciência digital, engajamento em diferentes níveis hierárquicos).

Tecnologia: ativos que tornam possível gerar, processar e usar dados digitais (por exemplo, ferramenta de inteligência de negócios, plataforma de computação em nuvem, MES, ERP, ferramentas de realidade aumentada e virtual).

Conectividade: elementos de infraestrutura necessários para a transmissão de dados dentro e fora da organização (por exemplo, recursos de compartilhamento de dados, segurança de TI, estruturação de dados padrão ou arquiteturas de transmissão de dados).

Criação de valor: modelos usados para gerar e capturar valor de dados (por exemplo, modelo de negócios *pay-per-use*, uso de dados para pedidos ou previsão de manutenção).

Competências: mentalidade e habilidades (internamente ou com base em parcerias externas) necessárias para abordar o processo de transformação digital (por exemplo, competências digitais, cultura de treinamento, cultura de aprendizagem).

A abordagem de avaliação consiste em cinco etapas sequenciais – criação de consciência, definição de escopo, coleta de dados, avaliação e seleção da solução e discussão que, de acordo com o princípio de organização do PBL, visam resolver o

problema, medindo o nível de maturidade digital da empresa avaliada, e possibilitar o aprendizado ativo em relação às especificidades da empresa ao mesmo tempo.

Os autores apresentam 3 estudos de caso utilizados para validação do modelo. Parte do processo de avaliação consiste na aplicação de um questionário com especialistas da organização, no entanto, a ferramenta utilizada não está disponível no estudo.

2.3.4 Modelo 4: Definição e avaliação dos níveis de maturidade da Indústria 4.0 - caso do setor de defesa

O modelo apresentado por Bibby e Dehe (2018) apresenta três dimensões e 13 atributos principais, chamados de critérios, que foram utilizados para avaliar a maturidade de um líder mundial em manufatura na área de defesa e de 12 outras empresas em sua rede de fornecimento. As dimensões são: Fábrica do Futuro, Pessoas e Cultura e Estratégia. A dimensão Fábrica do Futuro se concentra especificamente nas oito tecnologias e conceitos-chave por trás da Indústria 4.0 (BRETTEL *et al.*, 2014; QIN; LIU; GROSVENOR, 2016). Os autores identificaram cada um deles como atributos-chave da Indústria 4.0 após investigação na literatura. A dimensão Pessoas e Cultura é uma parte fundamental da implementação da Indústria 4.0 devido ao valor e poder das pessoas dentro das organizações (SCHWAB, 2016). Tendo por base uma cultura de inovação e melhoria contínua a organização abraça a mudança e prospera em novas oportunidades (FATORACHIAN; KAZEMI, 2018b; RODEN *et al.*, 2017). Os autores argumentam que, na dimensão Estratégia, sendo robusto e claro, um plano de investimento em tecnologia e uma visão de agilidade também são características importantes de uma organização para a maturidade da Indústria 4.0 (EROL *et al.*, 2016).

O estudo utiliza uma combinação de métodos de coleta de dados, incluindo: entrevistas semiestruturadas, workshops e pontuação de itens, que estão embutidos em uma lógica de estudo de caso, a fim de testar e validar o modelo que leva à geração dos dados empíricos do estudo. A empresa foi utilizada como base de teste, para validar o modelo e derivar dele as ferramentas de avaliação de maturidade. Uma vez que o modelo foi validado e aceito, 14 especialistas da empresa focal foram solicitados a completar a avaliação de maturidade para a organização. As escalas de

classificação usaram um sistema de pontuação em escala Likert de 1 a 5, onde 1 é a pontuação mais baixa possível e 5 é a pontuação mais alta possível.

Após cada seção da avaliação de maturidade ('fábrica do futuro', 'pessoas e cultura' e 'estratégia'), as pontuações foram agregadas para fornecer uma pontuação total. Ao final do modelo de avaliação, as pontuações de cada seção foram então utilizadas em relação a uma tabela de maturidade da Indústria 4.0. Para cada seção do modelo, as pontuações mínimas e máximas foram determinadas e então divididas para compor os quatro níveis de maturidade: 'Mínimo', 'Desenvolvimento', 'Definido' e 'Excelência'. 'Fábrica do Futuro' teve 16 itens da escala Likert, 'Pessoas e Cultura' teve 3 itens, 'Estratégia' teve quatro itens. Os itens de avaliação são tratados como itens de avaliação de maturidade e podem ser chamados de subcritérios do modelo. Os autores assumiram que existe uma relação linear entre as categorias. No entanto, com 16 itens, a 'Fábrica do Futuro' é a área mais importante, o que está em linha com a nossa interpretação da literatura. O estudo não apresenta em detalhes a metodologia de cálculo para mensuração da maturidade.

Como limitações do estudo, os autores ressaltam que a amostra de avaliação externa é razoavelmente baixa, fazendo com que a generalização dos resultados seja tomada com cautela. Ainda, os itens de medição desenvolvidos empiricamente que constituem a estrutura de maturidade poderiam ser desenvolvidos e validados posteriormente, o que permitiria aos tomadores de decisão terem uma confiança ainda maior nos resultados. Finalmente, reconhecem que o design da estrutura pode favorecer uma organização que teve um desempenho muito bom em uma característica tecnológica (ex. impressão 3D), pois aumentaria significativamente o nível de maturidade geral, ao contrário de uma empresa que tem estratégia e práticas tecnológicas consistentes e equilibradas.

Como sugestões dos autores, as áreas para pesquisas futuras devem se concentrar em melhorar a precisão da ferramenta de avaliação, bem como testar sua generalização para outras empresas e em outros setores. Para melhorar a precisão do modelo de avaliação, uma amostra maior de participantes aumentaria a credibilidade dos resultados do modelo.

2.3.5 Modelo 5: Modelo de maturidade em três estágios em PMEs rumo à Indústria

4.0

Ganzarain e Errasti (2016) propuseram um modelo de processo como um quadro orientador para a visão de diversificação colaborativa, estratégia e construção de ações da Indústria 4.0. Os autores sugeriram um modelo de estágios para orientar e treinar empresas para identificar novas oportunidades de diversificação na Indústria 4.0. Através da execução sistemática das etapas propostas, isso levaria a empresa à sua visão individual específica e visão colaborativa entre diferentes empresas no cenário da Indústria 4.0.

Os estágios são descritos como: Visão, Capaz e Agir. O estágio Visão 4.0 é definido por uma visão personalizada da Indústria 4.0, desenvolvendo suas próprias ideias gerais da Indústria 4.0 com capacidades e recursos específicos da empresa. Nesta etapa, especialistas e parceiros apoiam a organização na construção da visão da Indústria 4.0. O resultado é uma visão personalizada para um estado final futuro. No estágio Capaz, a empresa parte da visão definida anteriormente e tenta definir o portfólio de tecnologia e as capacidades necessárias para dar suporte às novas soluções de produto-serviço identificadas na etapa anterior. O *roadmap* facilitará o processo de planejamento e alinhamento de estratégias para visualizar e estruturar as diferentes estratégias definidas. O *roadmap* permite desenhar estratégias e restrições em camadas separadas em uma linha do tempo comum.

Os autores definiram quatro perspectivas estratégicas: mercado, produto, processo e rede de valor. O resultado é um mapa ordenado e de múltiplas perspectivas da estratégia geral em direção à visão da Indústria 4.0 que constrói o quadro estratégico para ações concretas. Os autores definiram cinco níveis de maturidade para o modelo proposto, são eles:

- Inicial: Não existe uma visão da indústria 4.0 específica da empresa;
- Gerenciado: existe um roteiro da estratégia da indústria 4.0;
- Definido: segmentos de clientes, proposta de valor e recursos-chave definidos;
- Transformado: Transformação da estratégia em projetos concretos;
- Modelo de Negócios Detalhado: Transformação do Modelo de Negócios.

O modelo foi aplicado em uma amostra representativa de PMEs no País Basco em uma primeira análise sob a forma de programa piloto. De forma específica, os autores afirmam que o projeto será aplicado em um município específico do País Basco, no qual os participantes do painel são empresas, agências de desenvolvimento

regional e a Universidade. O estudo não apresenta detalhes do modelo, tais como sua metodologia de avaliação e as limitações do estudo.

2.3.6 Modelo 6: Desenvolvimento de um modelo de maturidade da indústria 4.0 para o processo de entrega na cadeia de abastecimento

Asdecker e Felch (2018) desenvolveram um modelo voltado para a logística de saída, ou seja, o processo de entrega, que pode ser definido como todas as atividades necessárias para atender um pedido do cliente. Segundo os autores, os modelos disponíveis na literatura abordam apenas a manufatura, e o modelo proposto preencheria essa lacuna de pesquisa.

Para destacar o foco no processo de entrega em conjunto com a Indústria 4.0, o modelo foi denominado Modelo de Maturidade do Processo de Entrega (DPMM) 4.0. Os estágios de maturidade do DPMM 4.0 são baseados no modelo desenvolvido por Leyh *et al.* (2016) denominado *System Integration Maturity Model Industry 4.0* (SIMMI 4.0) e adotados para o processo de entrega. São eles:

- Estágio 1 - digitalização básica;
- Estágio 2 - digitalização entre departamentos;
- Estágio 3 - digitalização horizontal e vertical;
- Estágio 4 - digitalização completa;
- Estágio 5 - digitalização total otimizada.

Os cinco estágios de maturidade são aplicados a três dimensões (processamento de pedidos, armazenamento e envio). Cada dimensão apresenta de três a sete elementos e a metodologia completa de cálculo é detalhada no estudo. O alto nível de detalhes permite análises ricas dos resultados de maturidade e melhora a capacidade de derivar um caminho de desenvolvimento específico da cadeia de suprimentos.

O DPMM 4.0 final foi implantado com sucesso em uma empresa que apoiou o desenvolvimento como parte interessada. O estudo apresenta um desenvolvimento teoricamente fundamentado e metodologicamente rigoroso de um modelo de maturidade para os processos de entrega de empresas de manufatura. Segundo os autores, o valor do modelo apresentado reside na combinação de rigor científico, relevância prática e aplicabilidade direta. Em suma, o DPMM 4.0 permite que uma

organização determine seu nível de maturidade atual em cada sub processo de entrega, para comparar seu nível de maturidade atual com outras unidades de negócios e / ou empresas, para desenvolver uma visão corporativa para a excelência em logística de entrega, para identificar potenciais medidas de melhoria e para fornecer orientação sobre o caminho de desenvolvimento.

Como limitações do estudo, os autores argumentam que, em primeiro lugar, os modelos de maturidade geralmente estão sujeitos a críticas (ALBLIWI; ANTONY; ARSHED, 2014), com alguns autores argumentando que modelos simplificam demais a realidade e que sua hipótese de estágio fundamental carece de base empírica (BENBASAT *et al.*, 1984). Em segundo lugar, embora o processo de desenvolvimento tenha sido apoiado por publicações anteriores e trabalhos empíricos, essas opiniões e julgamentos de especialistas ainda contêm um certo grau de subjetividade. Além disso, a população do modelo e o processo de avaliação foram baseados principalmente em especialistas de empresas industriais alemãs, o que impõe um viés regional potencial. Portanto, pesquisas futuras deveriam considerar uma perspectiva mais internacional bem como um maior número de estudos de caso afim de dar mais robustez a aplicabilidade do modelo.

2.3.7 Modelo 7: Um modelo de maturidade da indústria 4.0 com base em regras *fuzzy* para operações e gerenciamento da cadeia de fornecimento

Caiado *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de maturidade com uma ferramenta de avaliação que aborda a imprecisão trazida pelo julgamento humano e a incerteza e ambiguidade inerentes à avaliação do gerenciamento da cadeia de suprimentos (OSCM). O modelo foi baseado em lógica *fuzzy* para OSCM construído em uma abordagem multimetodológica que compreende uma revisão da literatura, entrevistas, grupos focais e estudo de caso, desde a concepção do modelo à avaliação do modelo. Segundo os autores, para fornecer uma avaliação mais realista, a lógica *fuzzy* e a simulação de Monte Carlo são incorporadas a uma ferramenta de prontidão para autoavaliação, que está conectada com a arquitetura do modelo. O modelo proposto foi validado por meio de uma aplicação real em uma organização multinacional de manufatura.

O estudo propõe um modelo para avaliar a maturidade 4.0 de empresas de manufatura com base em um sistema especialista probabilístico difuso para superar

a imprecisão e incerteza de MMs anteriores, abordando a complexidade da percepção do nível de digitalização em OSCM. O uso da lógica *fuzzy* elimina a ambiguidade na alocação do grau de compatibilidade de uma amostra com um conceito semântico no julgamento humano. Além disso, as distribuições probabilísticas da simulação de Monte Carlo podem lidar com a incerteza estatística.

Os autores definiram cinco níveis de maturidade: inexistente, conceitual, gerenciado, avançado e auto otimizado. Em relação às dimensões para avaliar a maturidade, apontaram como dimensões-chave para avaliar a evolução das cadeias de abastecimento e operações: *Supply Chain Management (SCM)*, *Supply Chain Management (SCM) & Production and Operations Management (POM)* e *Production and Operations Management (POM)*. Dentro das dimensões os autores argumentam que devam ser consideradas o que eles chamaram de subcategorias, as perspectivas: Cliente, Logística, Fornecedor, Integração, Produção, Planejamento e Controle (PPC), Qualidade e Manutenção.

As limitações do estudo estão relacionadas ao fato de que apenas uma empresa de um setor industrial específico com características próprias foi avaliada. Também, deve-se analisar se existem discrepâncias significativas quanto à maturidade em diferentes contextos, realizar um levantamento longitudinal e avaliar a maturidade em diferentes momentos, aplicando um roteiro com metas periódicas. Ainda, sugerem realizar um estudo que considere a tomada de decisão em grupo com métodos de auxílio à decisão multicritério e, por fim, a criação de um sistema especialista estratégico para abordar as lacunas de maturidade (entre os estados atuais e esperados).

2.3.8 Modelo 8: Uma ferramenta de avaliação baseada no nível de maturidade para melhorar a implementação de uma Indústria 4.0 em pequenas e médias empresas

Rauch *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de maturidade voltado para PMEs com múltiplos objetivos, tais como: (i) informar as PMEs sobre os conceitos existentes da Indústria 4.0, (ii) avaliar os atuais avanços na implementação e aplicação desses conceitos, e (iii) sinalizar para as PMEs quais dos conceitos da Indústria 4.0 são os mais importantes para a empresa de forma individual. O estudo identificou 75 tópicos da Indústria 4.0 que foram condensados em 42 conceitos e

tecnologias significativas da Indústria 4.0, usados como base para o modelo de avaliação proposto. O amplo espectro de conceitos e tecnologias identificados da Indústria 4.0 exigiu a estruturação em vários níveis de dimensões da Indústria 4.0. No primeiro nível da dimensão, os conceitos foram classificados da seguinte forma:

- Operações (conceitos/tecnologias para processos produtivos e operacionais);
- Organização (conceitos/tecnologias para processos organizacionais e orientados para a gestão);
- Sociocultural (conceitos/tecnologias relacionados à cultura corporativa e tópicos relacionados aos funcionários);
- Tecnologia (tecnologias orientadas a dados e processos).

No nível da segunda dimensão, um total de 21 subdimensões foram identificadas. A avaliação do modelo é através da classificação em uma escala Likert de 1 a 5 com uma breve descrição dos cinco níveis de maturidade para cada um dos 42 conceitos. Além do nível de maturidade atual, um nível de maturidade desejado e a importância e potencial dos conceitos da Indústria 4.0 são avaliados por usuário. Os resultados mostram em uma matriz de estratégia normativa, quais dos conceitos da Indústria 4.0 devem ser abordados imediatamente e quais podem demandar mais tempo ou não são implementados imediatamente devido ao menor potencial.

Participaram no estudo de campo 17 pequenas e médias empresas que operam em diferentes setores industriais da Itália (10), Áustria (3), Eslováquia (1) e EUA (3). As empresas participantes do estudo operavam principalmente na fabricação de bens industriais (6), suprimentos e materiais industriais (4), construção (3), alimentos (2) e outras indústrias (2). Destas empresas, sete eram pequenas empresas com até 49 funcionários e 10 eram empresas de médio porte com 50–249 funcionários de acordo com a definição utilizada pelos autores.

O modelo possui algumas limitações. Uma limitação é o que os autores chamam de esforço de avaliação, que diz respeito ao tempo gasto para realização e o número de participantes envolvidos na análise. Portanto, recomenda-se que uma equipe faça a avaliação para melhorar não só a qualidade das respostas, mas também a objetividade do resultado. Uma terceira limitação apontada pelos autores é a quantidade de 42 conceitos da Indústria 4.0 usados.

2.3.9 Modelo 9: Um modelo de maturidade da Indústria 4.0 para empresas de máquinas-ferramentas

Rafael *et al.* (2020) desenvolveram um modelo para as empresas de Máquinas-Ferramenta (MT), principalmente as PMEs. O modelo foi adaptado do modelo IMPULS desenvolvido por Lichtblau *et al.* (2015). Uma empresa foi escolhida como estudo de caso para testar a nova ferramenta. Os níveis de maturidade, adaptados do modelo IMPULS são:

- Não Iniciado: Uma empresa neste nível não atende a nenhum dos requisitos da Indústria 4.0. O nível 0 também é atribuído automaticamente às empresas que indicaram que a Indústria 4.0 era desconhecida ou irrelevante para elas.
- Iniciante: as organizações começam a implementar iniciativas piloto da Indústria 4.0.
- Intermediário: as organizações incorporam uma iniciativa da Indústria 4.0 em sua orientação estratégica.
- Experiente: uma empresa neste nível formulou uma estratégia da Indústria 4.0. Está fazendo investimentos relacionados à Indústria 4.0 em várias áreas
- Especialista: um especialista já está usando uma estratégia da Indústria 4.0 e monitorando-a com indicadores apropriados. Os investimentos estão sendo feitos em quase todas as áreas relevantes.
- Melhores desempenhos: Uma empresa deste nível já implementou a sua estratégia Indústria 4.0 e monitoriza regularmente o estado de implementação de outros projetos.

Foram definidas seis dimensões para o modelo adaptado, sendo elas: Funcionários, Estratégia e organização, Fábrica Inteligente, Orientação à Dados, Operações Inteligentes e Produtos Inteligentes. 24 sub dimensões foram definidas para avaliação da maturidade de cada dimensão proposta no modelo.

Conforme indica a metodologia IMPULS, a avaliação é feita através de um questionário padronizado que consiste numa questão fechada por subdimensão. Todas as questões são respondidas com a avaliação da escala Likert, variando de “0” não tem implementação a “5” completo ou alto nível de implementação. Para cada subdimensão, são apresentadas as questões de avaliação que configuram a pontuação de 0 a 5.

Os autores realizaram a aplicação do novo modelo em uma organização, porém, não apresentaram em detalhes a forma de avaliação, apenas os resultados obtidos. Também não apresentaram limitações do estudo.

2.3.10 Modelo 10: Avaliação da prontidão digital de PMEs italianas: uma pesquisa de estudo de caso

O modelo desenvolvido por Pirola, Cimini e Pinto (2019) busca avaliar a prontidão e maturidade das PMEs que, segundo Moeuf *et al.* (2018) é mais complexa pois subexploram ou ignoram algumas tecnologias e práticas inovadoras disponíveis. Os autores afirmam que a maioria dos modelos de maturidade desenvolvidos anteriormente foram concebidos para examinar diferentes departamentos da empresa ou ferramentas de TIC específicas. No entanto, muitas vezes, as PMEs não possuem uma estrutura claramente definida, tanto a nível operacional como de gestão. Outra lacuna apresentada pelos autores se refere a falta de modularidade dos modelos disponíveis. Esta falta obriga que sejam avaliadas todas as áreas dos modelos, mesmo aquelas que não se aplicam aos contextos específicos, podendo, assim, influenciar negativamente no índice final obtido.

Nomeado de *Digital Readiness Level 4.0* (DRL 4.0), o modelo compreende 46 questões de avaliação, sendo: 12 questões fechadas sobre as estatísticas vitais da empresa visam identificar o tamanho da empresa em termos de emprego e volume de negócios, a indústria e as características gerais do processo de produção; e 24 questões em escala Likert de cinco pontos relacionadas a implementação tecnológica da indústria 4.0 na organização, abrangendo cinco dimensões, estratégia, pessoas, processos, tecnologia e integração. As cinco dimensões foram escolhidas com base nas mais utilizadas nas avaliações de prontidão da indústria presentes na literatura. A seção final inclui dez questões de escolha única sobre os investimentos que a empresa examinada está empreendendo ou pretende realizar no curto prazo. Essas perguntas podem influenciar a pontuação final onde, se uma empresa está realizando um investimento em uma tecnologia, um incremento é atribuído à pontuação para a implementação atual dessa tecnologia.

Foi realizado um estudo de caso múltiplo onde cerca de 22 PMEs foram avaliadas. Duas organizações durante a primeira etapa de validação do DRL 4.0, e os ajustes no modelo foram realizados. Após os ajustes, 20 PMEs italianas de diferentes

setores tiveram seu DRL 4.0 avaliados. Os autores não apresentaram limitações da pesquisa.

2.4 Discussão dos modelos de maturidade apresentados

A revisão de literatura indicou dez modelos de maturidade para a Indústria 4.0. Todos os modelos analisados baseiam-se nos principais conceitos e tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, e consideram que estas tecnologias aplicadas ao ambiente organizacional são capazes de implementar significativas mudanças na competitividade das empresas e novas oportunidades de negócios. De forma geral, os modelos analisados abrangem as principais áreas estruturais das empresas, contemplando produtos, instalações, operações e processos de gestão, força de trabalho, cultura organizacional, recursos tecnológicos, conforme observado na revisão de literatura.

Os modelos analisados avaliam a maturidade em diferentes áreas, chamadas dimensões, e cada dimensão é descrita por diversos recursos de transformação. A maturidade da Indústria 4.0 é avaliada avaliando o grau de implementação de cada capacidade de transformação e conseqüentemente de cada dimensão. O Quadro 2 mostra as dimensões utilizadas pelos modelos analisados.

Quadro 2 - Dimensões utilizadas pelos modelos de maturidade analisados

Artigo	Dimensões
<i>Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice</i>	Pessoas e cultura, Conscientização da Indústria 4.0, Estratégia organizacional, Cadeia de valor e processos, Tecnologia de manufatura inteligente, Tecnologia orientada a produtos e serviços e Tecnologia de base da Indústria 4.0
<i>An Industry 4.0 maturity model proposal</i>	Estratégia, Estrutura e cultura organizacional, Força de trabalho, Fábricas inteligentes, Processos inteligentes e Produtos e serviços inteligentes
<i>A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era</i>	Governança, Tecnologia, Conectividade, Criação de valor e Competências
<i>Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defense sector</i>	Fábrica do futuro, Pessoas e cultura e Estratégia
<i>Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0</i>	Visão, Capacidade e Ação
<i>Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains</i>	Processamento de pedidos, Armazenamento e Envio

<i>A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management</i>	<i>Supply chain management</i> , Produção e gerenciamento de operações e <i>Supply chain management</i> , Produção e gerenciamento de operações
<i>A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises</i>	Operações, Organização, Cultura e Tecnologia
<i>An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies</i>	Funcionários, Estratégia e organização, Fábrica inteligente, Orientação à dados, Operações inteligentes e Produtos inteligentes
<i>Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research</i>	Estratégia, Pessoas, Processos, Tecnologia e Integração

Fonte: Autoria própria (2022).

A partir da análise do Quadro 2, pode-se afirmar que as dimensões utilizadas pelos diferentes modelos estão relacionadas não apenas aos aspectos tecnológicos, mas, também, organizacionais. O roteiro para implementação da Indústria 4.0 deve incluir questões relacionadas à liderança, cultura, recursos humanos e os próprios produtos e serviços da empresa, além daqueles relacionados a operações e tecnologia. Os aspectos que divergem estão relacionados ao seu conteúdo, diferenças existentes na quantidade e descrição dos níveis de maturidade, nos componentes e subcomponentes analisados, na objetividade e nos critérios de mensuração dos níveis de maturidade.

No Apêndice 2, pode ser visualizada uma síntese dos MMs analisados onde constam em mais detalhes as dimensões, o número de itens de avaliação, os níveis de maturidade, o método de avaliação, se o modelo apresentado foi aplicado, se apresenta questionário, perspectiva PME e limitações do estudo.

2.5 Método de auxílio à decisão *Analytic Hierarchy Process*

O AHP foi introduzido por Thomas L. Saaty na década de 1970 (GUARNIERI; TROJAN, 2019) e constitui um método extensivamente utilizado para a tomada de decisão multicritério. Consiste num modelo que reflete o funcionamento da mente humana no que diz respeito à avaliação de diferentes alternativas, e tem como principal resultado a priorização de alternativas através da comparação de pares em relação a cada um dos critérios, onde se utilizam dados concretos de entrada (SAATY, 2006). Incorpora vários fatores subjetivos, relacionados com a intuição do decisor, o que permite lidar com aspetos tangíveis e intangíveis, dada a sua capacidade de criar

medidas para aspectos qualitativos (SAATY, 1990), o que o torna mais flexível (GUARNIERI; TROJAN, 2019).

Este método organiza o problema mediante uma estrutura hierárquica e prioriza múltiplos critérios dentro de clusters e elementos, especificando determinados níveis que, tipicamente, correspondem aos critérios de avaliação, subcritérios e ao alcance de objetivos (SAATY, 2006). A escala fundamental de Saaty auxilia na comparação do desempenho das alternativas, usando números absolutos de 1 a 9, como se observa no Quadro 3.

Os passos necessários à aplicação do método AHP são descritos em seguida e estão representados no esquema presente na Figura 3.

Figura 3 - Aplicação do Método AHP.



Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

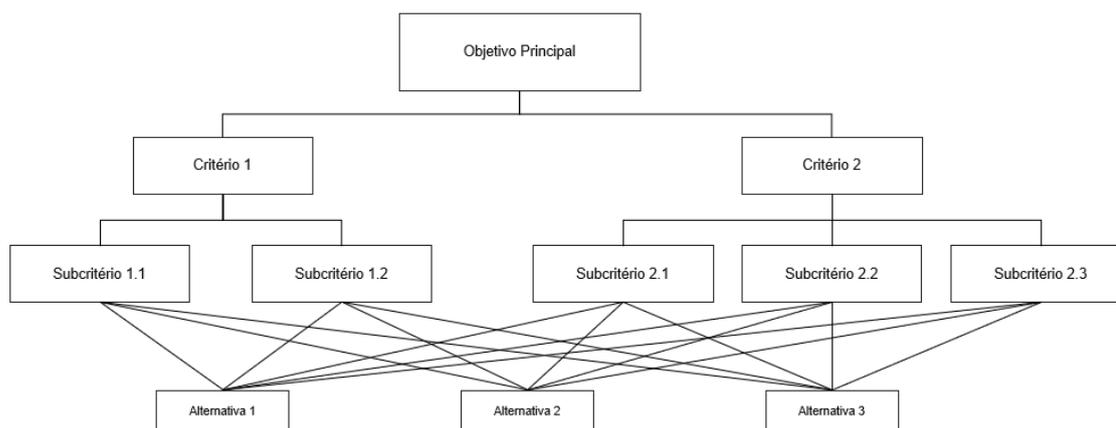
Quadro 3 - Escala Fundamental de Saaty

Intensidade	Definição	Explicação
1	Importância igual	Dois elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem levemente um elemento em relação ao outro
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um elemento em relação ao outro
7	Importância muito forte	Um elemento é fortemente favorecido em relação ao outro, sua dominância é evidenciada em prática
9	Importância extrema	A evidência de dominância de um elemento em relação ao outro é do mais alto grau de certeza
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

1º Passo – Decomposição do problema numa hierarquia de critérios previamente definidos, como ilustra a Figura 4. Partindo do objetivo principal, cada critério de um mesmo nível pode ser decomposto em dois ou mais subcritérios, o que facilita a compreensão do problema.

Figura 4 - Estruturação hierárquica do problema



Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

2º Passo – A estimativa dos pesos dos critérios e subcritérios baseia-se na comparação par a par de todos os critérios subordinados a um mesmo elemento hierárquico, de acordo com a escala fundamental de Saaty, presente no Quadro 3. O objetivo é estabelecer a importância de cada elemento individualmente e como resultado surgem matrizes de comparação de preferências que servem de base para o cálculo dos pesos relativos de cada critério e subcritério. Na Tabela 1 encontra-se uma representação genérica da matriz de preferências dos critérios, sendo que na diagonal é colocado o valor de 1 (cada critério ou subcritério tem a mesma importância sobre si mesmo).

Tabela 1 - Matriz de preferências dos critérios

	Critério 1	Critério 2	Critério 3
Critério 1	1		
Critério 2		1	
Critério 3			1

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

A normalização da matriz resulta da divisão de cada elemento pela soma da respectiva coluna, onde w_{xy} corresponde ao valor normalizado de cada elemento a_{xy} e $\sum_{x=1}^n a_{xy}$ representa a soma dos valores das colunas. Em seguida, calcula-se a média dos valores por linha e obtêm-se as importâncias relativas dos critérios ou vetores de prioridade/peso sendo que a sua soma deve ser igual a Equação (1).

$$\sum_{x=1}^n w_x = 1 \quad (1)$$

A consistência das comparações efetuadas pelo decisor é quantificada através do cálculo do índice de consistência (Saaty, 1994). Os julgamentos comparativos efetuados têm por base a subjetividade e podem revelar incoerência. O Índice de Consistência (IC) é dado pela Equação (2), sendo n o número de critérios avaliados e $\lambda_{máx}$ o valor máximo próprio da matriz de comparações, obtido pelo produto entre os valores normalizados da matriz e os vetores de prioridade, conforme Equação 2.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Em seguida, tem-se o Cálculo da Razão de Consistência (RC) dado pela Equação (3), em que IC é o Índice de Consistência calculado na Equação (2) e IR é o Índice Randômico estipulado pelo Quadro 4. Se o valor encontrado for $< 10\%$, os julgamentos foram coerentes, caso contrário os julgamentos terão de ser reavaliados (Saaty, 1994).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3)$$

Tabela 2 - Índice médio de consistência randômica

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistência randômica (IR)	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (2004).

3º Passo – A estimação dos vetores de prioridade das alternativas em relação a cada critério individual assenta no pressuposto de que cada alternativa, em cada critério/subcritério, possui uma pontuação. Daqui resulta a matriz de comparação das alternativas, representada na Tabela 3. A atribuição de ponderações é igualmente realizada pelos decisores e os cálculos para os vetores de prioridade são os mesmos referidos no 2º passo. Por fim, é necessário calcular a razão de consistências (RC) a fim de validar a robustez das comparações realizadas pelos decisores.

Tabela 3 - Matriz de preferências das alternativas

	Alternativa 1	Alternativa 2	...	Alternativa <i>n</i>
Alternativa 1	1			
Alternativa 2		1		
...			1	
Alternativa <i>n</i>				1

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

4º Passo – O ranking final é o resultado do método AHP e é conseguido através do produto dos vetores de prioridade das alternativas pelos vetores de prioridade dos subcritérios, onde a pontuação atribuída a cada alternativa reflete a importância que cada opção representa para o atributo em questão. O resultado da aplicação do método é apenas um auxílio à tomada de decisão, sendo que a escolha nem sempre passa pela alternativa que maximiza cada critério individualmente, mas, sim, por aquela que representa o melhor compromisso de entre todos os critérios utilizados na comparação.

5º Passo – A análise de sensibilidade pretende determinar a variação das ponderações que deve ocorrer, de forma a alterar o resultado final. Deste modo, conclui-se acerca da robustez dos resultados obtidos dado que, se o novo *ranking* obtido não sofrer alterações comparativamente ao anterior, afirma-se que o resultado encontrado é robusto.

2.6 Método *Fuzzy* TOPSIS

Em uma lógica clássica, o tomador de decisão geralmente separa conjuntos, ou seja, separa as opções que possui através de julgamentos e critérios que acabam não levando em consideração todos os fatores que deveriam. Sendo assim, a lógica clássica acaba não exprimindo a veracidade dos fatores ou critérios que o problema a ser modelado requer. Nesse sentido, a lógica *fuzzy* se mostra importante pois se diferencia da lógica clássica, trazendo características e técnicas próprias para se tratar um determinado problema (GOMIDE, GUDWIN, TANSCHHEIT, 1995).

Desenvolvida pelo estudioso Lofti Zadeh na década de 60, busca traduzir em uma linguagem comum o que as pessoas pensam sobre determinada situação, para que se consiga modelar o problema e expressar soluções e respostas precisas. Essa lógica tem sua definição como sendo um método matemático promitente para

modelagens que combinam incerteza, ambiguidade, imprecisão e, principalmente, subjetividade (LANZILLOTTI; LANZILLOTTI, 1999).

Mesmo que a teoria *fuzzy* consiga apresentar melhores resultados para problemas com informações de caráter subjetivo, é importante ressaltar que essa teoria teve seu desenvolvimento a partir da teoria clássica dos conjuntos, onde a identificação de um componente como parte ou não de um conjunto é definida por uma determinada função característica (FRANÇA, 2015). Porém, para conjuntos onde os cenários não se apresentam de uma forma exata, recomenda-se o uso da função pertinência, da qual a imagem deixa de ser o conjunto $\mu_a(X): \rightarrow \{0,1\}$, da função característica, e toma forma de um intervalo $\mu_a(X): \rightarrow [0,1]$, condicionado a fim de que os elementos pertencentes ao intervalo consigam fazer parte de um determinado conjunto (ORTEGA, 2001).

Consoante a França (2015), quando se obteve a ampliação da “função característica” para a “função de pertinência” no intervalo $[0,1]$, teve-se um marco dos conjuntos *fuzzy*, pois, a partir daí, foi viabilizado o uso de variáveis linguísticas, reduzindo o grau de incerteza no desenvolvimento de diversas soluções.

Utilizando a linguagem *fuzzy* é possível transformar valores qualitativos e imprecisos em valores quantitativos e precisos. Entretanto, para que essa transformação ocorra, os valores das variáveis devem estar previamente determinados, de modo que, para cada dado qualitativo lançado, seja atribuído automaticamente um intervalo quantitativo em uma escala linguística *fuzzy*. Os critérios para a realização desta escala são determinados pelo tomador de decisão, abrangendo diversos fatores que são relevantes para se chegar a melhor solução do problema.

Após a definição dos critérios pelo tomador de decisão, é possível estabelecer uma tabela com os termos e valores linguísticos, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Termos e valores linguísticos	
Termos linguísticos	Valores Linguísticos
Discordo Totalmente (DT)	(0.00, 0.00, 0.25)
Discordo (D)	(0.00, 0.25, 0.50)
Indiferente (I)	(0.25, 0.50, 0.75)
Concordo (C)	(0.50, 0.75, 1.00)
Concordo Totalmente (CT)	(0.75, 1.00, 1.00)

Fonte: Autoria própria (2022)

É necessário que cada termo linguístico possua uma referência em valores linguísticos, tendo em vista que a linguagem *fuzzy* transforma dados qualitativos em dados quantitativos. Esses três valores que formam o valor linguístico de cada termo é o que se chama grau de pertinência, pois, uma vez que vai aumentando positivamente o dado qualitativo, o dado quantitativo também é aumentado (JUNIOR; CARVALHO; CARPINETTI, 2016).

O método TOPSIS foi proposto inicialmente por Hwang e Yoon (1981). Visando adequar o método TOPSIS para tomada de decisão em cenários de incerteza, Chen (2000) propôs a primeira combinação entre este método e a teoria dos conjuntos *fuzzy*, denominada *fuzzy* TOPSIS. O princípio básico do TOPSIS consiste em escolher uma alternativa que esteja tão próxima quanto possível da solução ideal positiva e o mais distante quanto possível da solução ideal negativa.

A solução ideal é formada tomando-se os melhores valores alcançados pelas alternativas durante a avaliação em relação a cada critério de decisão, enquanto a solução ideal negativa é composta de forma similar, tomando-se os piores valores. O princípio do método *fuzzy* TOPSIS também é baseado na distância entre as pontuações e as soluções ideais positiva e negativa. Os passos desse método são descritos a seguir (CHEN, 2000; OSIRO; LIMA-JUNIOR; CARPINETTI, 2014):

1. Agregar os valores linguísticos fornecidos por cada tomador de decisão (DM_r) em relação à pontuação das alternativas e ao peso dos critérios. A equação 6 é usada para agregar as pontuações das alternativas. Nessa equação, \tilde{x}_{ij}^r descreve as pontuações da alternativa A_i ($i = 1, \dots, n$), em relação ao critério C_j ($j = 1, \dots, m$), dado pelo tomador de decisão DM_r ($r = 1, \dots, k$). As avaliações dos pesos dos critérios são agregadas usando a equação 7, em que \tilde{w}_{ij}^r descreve o peso do critério, dado por DM_r :

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{k} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^r + \dots + \tilde{x}_{ij}^k] \quad (6)$$

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{k} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^k] \quad (7)$$

2. Montar uma matriz de decisão *fuzzy* \tilde{D} para as pontuações das alternativas e um vetor *fuzzy* \tilde{W} para o peso dos critérios de acordo com as equações 8 e 9, respectivamente.

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ A_1 & \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1j} & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_i & \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \dots & \tilde{x}_{ij} & \dots & \tilde{x}_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_n & \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \dots & \tilde{x}_{nj} & \dots & \tilde{x}_{nm} \end{matrix} \quad (8)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_m] \quad (9)$$

3. Normalizar a matriz \tilde{D} . A matriz normalizada \tilde{R} é dada pela equação 10, sendo \tilde{r}_{ij} obtido por meio das equações 11 ou 12.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (10)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j}, \frac{m_{ij}}{u_j}, \frac{u_{ij}}{u_j} \right), \text{ sendo } u_j^+ = \max_i u_{ij} \text{ (critérios de benefício)} \quad (11)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_j}, \frac{l_j^-}{u_j}, \frac{l_j^-}{u_j} \right), \text{ sendo } l_j^- = \min_i l_{ij} \text{ (critérios de custo)} \quad (12)$$

4. Obter a matriz normalizada e ponderada \tilde{V} (equação 13) por meio da multiplicação dos pesos \tilde{w}_j pelos elementos \tilde{r}_{ij} da matriz normalizada, conforme a equação 14;

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad (13)$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{w}_j \quad (14)$$

5. Definir a solução ideal positiva fuzzy (*Fuzzy Positive Ideal Solution, FPIS, A⁺*) e a solução ideal negativa (*Fuzzy Negative Ideal Solution, FNIS, A⁻*) conforme as equações 15 e 16, em que $\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1)$ e $\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0)$;

$$A^+ = \{ \tilde{v}_1^+, \tilde{v}_j^+, \dots, \tilde{v}_m^+ \} \quad (15)$$

$$A^- = \{ \tilde{v}_1^-, \tilde{v}_j^-, \dots, \tilde{v}_m^- \} \quad (16)$$

6. Calcular a distância \tilde{D}_i^+ entre os valores de FPIS e os valores da matriz \tilde{R} usando a equação 17. Analogamente, calcular a distância \tilde{D}_i^- entre os valores de FNIS e a matriz \tilde{R} usando a equação 18. Nas equações 17 e 18, $d(., .)$ representa a distância entre dois números *fuzzy* de acordo com o método *vertex*, que, para o caso de números *fuzzy* triangulares, pode ser obtida por meio da equação 19;

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (17)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (18)$$

$$d(\tilde{x}, \tilde{z}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(l_x - l_z)^2 + (m_x - m_z)^2 + (u_x - u_z)^2]} \quad (19)$$

7. Calcular o coeficiente de aproximação CC_i de acordo com a equação 20;

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (20)$$

8. Definir um ranking por meio da ordenação decrescente dos valores de CC_i . Quanto mais próximo de 1,0 for este valor, melhor é o desempenho global da alternativa.

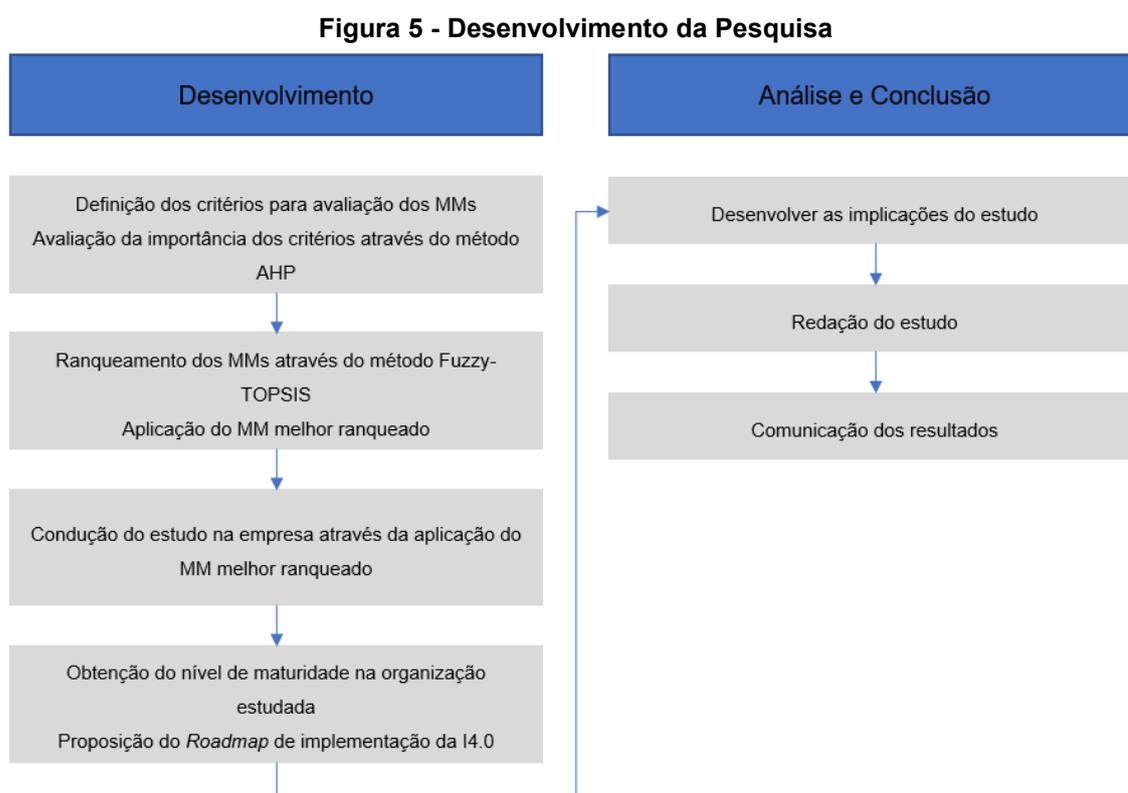
Apresentada a fundamentação teórica, o capítulo seguinte apresenta o delineamento metodológico da pesquisa.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A construção social como ponto de partida da realidade em estudo e o interesse nas perspectivas dos participantes são os aspectos essenciais da pesquisa (FLICK, 2009) que visa não a generalização de conceitos, mas, sim, uma forma de reunir conhecimento sobre o mundo social (CORBIN; STRAUSS, 2008). O presente estudo busca lançar novas perspectivas sobre a análise de maturidade na Indústria 4.0 com foco em PMEs. Assim, nesta seção são descritas as etapas utilizadas para o desenvolvimento do *framework* para análise de maturidade na Indústria 4.0.

3.1 Desenvolvimento do Estudo

O trabalho proposto inicialmente avalia a importância dos critérios que serão utilizados na avaliação dos MMs através do método multicritério de apoio à decisão AHP e, após, faz o ranqueamento dos MMs através da aplicação do Método multicritério Fuzzy TOPSIS para obtenção do ranking final dos MMs avaliados. Assim, a pesquisa seguiu as etapas apresentadas na Figura 5.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.1.1 Seleção dos Respondentes

Conforme apresentado na revisão de literatura, sabe-se que a adoção da Indústria 4.0 flexibiliza os sistemas de produção e que a aplicação da Indústria 4.0 em grandes empresas ocorre de maneira distinta das PMEs, (ARNOLD; KIEL; VOIGT, 2016). Nesse contexto, os respondentes são pessoas atuantes na empresa em funções táticas e estratégicas, com envolvimento nas atividades estratégicas e de planejamento do processo produtivo, com conhecimento sobre o Modelo de Negócios e as estratégias de produção da empresa. Desta forma, participaram da entrevista Diretores, Gerentes e Supervisores das áreas Administrativas, Estratégia, Engenharia, Operações, Produção, Projetos e Tecnologia, para conseguir avaliar as dimensões tecnológicas e de estratégias organizacionais.

3.1.2 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada em duas fases distintas, conforme demonstrado no Desenvolvimento da Pesquisa. A primeira fase consistiu em reuniões com gestores da organização no formato de *workshops*, com objetivo de obter um consenso quanto a importância dos critérios para avaliação dos MMs. Desta forma, participaram desta etapa seis gestores envolvendo as áreas comercial, administrativa, financeira, logística e industrial. A definição dos critérios foi elaborada com base na análise de literatura e dos MMs analisados, a avaliação da importância dos critérios foi realizada com aplicação do Método AHP.

Os *workshops* com gestores especialistas foram realizados entre junho e agosto de 2021, contabilizando seis horas e vinte e oito minutos. O perfil dos gestores que participaram dos workshops é apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Perfil dos Gestores

Tipo de Fonte	Função	Área de atuação
Gestor	Gerente Industrial	Produção
Gestor	Gerente de Materiais	Suprimentos
Gestor	Gerente Comercial	Comercial e Marketing
Gestor	Gerente Administrativo	Administrativo

Gestor	Gerente de Finanças e Planejamento tributário	Financeiro
Gestor	Gerente de Logística	Logística

Fonte: Autoria própria (2022).

A segunda fase constitui-se na coleta de dados durante a aplicação do MM escolhido para avaliação de maturidade dentro da organização, onde participaram Diretores, Gerentes, Supervisores. Esta etapa foi precedida pela etapa de ranqueamento dos MMs por meio da aplicação do Método *Fuzzy TOPSIS*. As entrevistas foram realizadas a partir de um roteiro semiestruturado, que serve para obter relatos retrospectivos e em tempo real das pessoas que experimentam o fenômeno de interesse teórico na realidade. O roteiro seguiu as etapas propostas pelo MM, e buscou avaliar a maturidade da organização de acordo com as dimensões propostas.

Foram realizadas quinze entrevistas, com dez gestores. Essas entrevistas ocorreram no período de setembro a dezembro de 2021. Devido a pandemia e às limitações de contato impostas, parte das entrevistas foram realizadas virtualmente, através das ferramentas Zoom™ e Teams™, que permitem a realização de gravação de vídeo chamadas. As entrevistas tiveram a duração média de 1 hora e 5 minutos, totalizando 16 horas e 16 minutos de material para análise. Todas as entrevistas tiveram sua gravação previamente autorizadas para que pudessem ser transcritas a fim de permitir a posterior análise das informações, conforme procedimento apresentado na Análise de Dados.

O perfil dos entrevistados é apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Perfil dos entrevistados

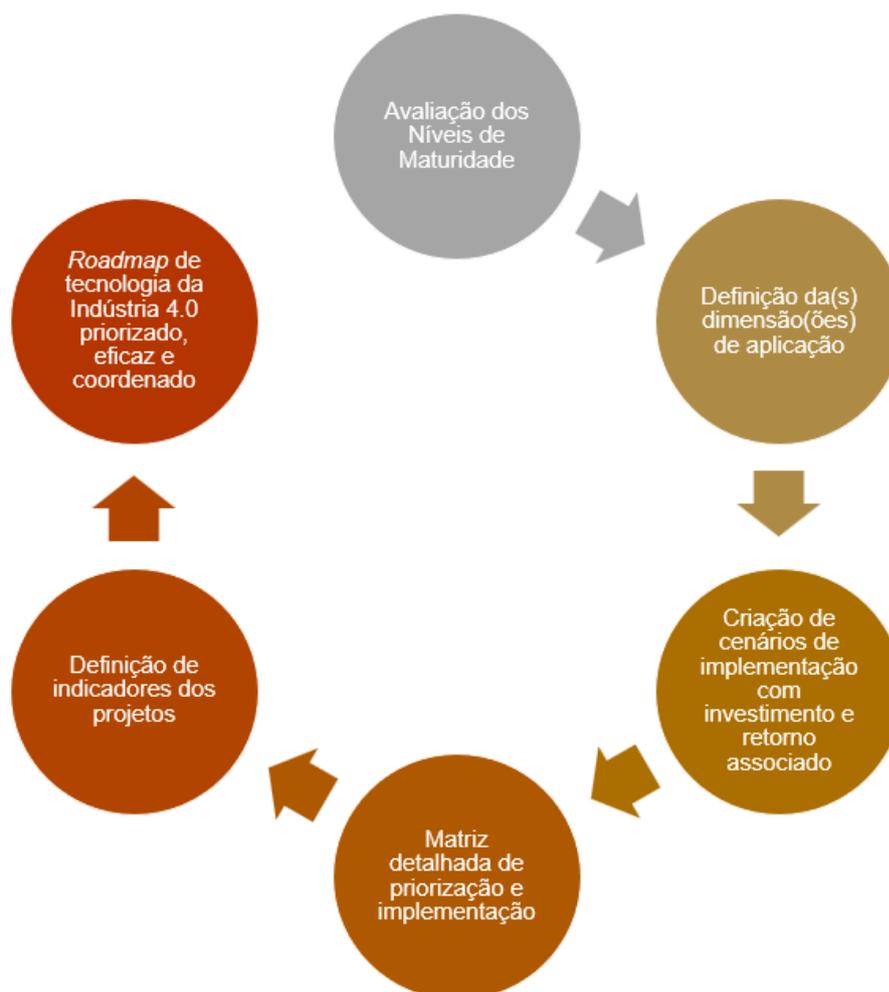
Tipo de Fonte	Função	Área de atuação
Gestor	Diretor Administrativo	Administrativa
Gestor	Gerente Administrativo	Administrativo
Gestor	Gerente de Finanças e Planejamento tributário	Financeiro
Gestor	Gerente de Controladoria	Controladoria
Gestor	Gerente Industrial	Produção
Gestor	Gerente de Materiais	Suprimentos
Gestor	Gerente Comercial	Comercial
Gestor	Gerente de Logística	Logística
Gestor	Supervisor de Planejamento	Planejamento
Gestor	Supervisor de T.I	T.I

Fonte: Autoria própria (2022).

3.1.3 *Roadmap* de implementação

Após a etapa de aplicação do MM, propõe-se a aplicação de um *roadmap* de implementação da Indústria 4.0 tendo como base o nível de maturidade da organização em análise. O *roadmap* de implementação deve seguir os seguintes passos após a avaliação do nível de maturidade e pode ser visualizado na Figura 6:

- Definição da dimensão (ou dimensões) em que os projetos serão aplicados;
- Criação de cenários de implementação com respectivo investimento e retorno associados para que seja possível compará-los entre si e tomar decisões;
- Estabelecer uma matriz detalhada de priorização e implementação, seguindo uma abordagem holística onde a implementação é considerada como um projeto e não como um conjunto de iniciativas isoladas. Este *roadmap* de implementação considera as sinergias tecnológicas, a sequência lógica de implementação e a preparação da organização para a gestão da mudança;
- Para cada uma das iniciativas definidas no *roadmap*, estabelecer um indicador que meça a sua contribuição para o objetivo estratégico definido para o projeto. Desta forma, a alta direção estará diretamente envolvida e comprometida com o acompanhamento das iniciativas definidas;
- Criar um sistema eficaz de acompanhamento da implementação, que elimine os gargalos e permita a tomada de decisão com agilidade com a participação da alta direção.

Figura 6 - Roadmap de implementação da Indústria 4.0

Fonte: Autoria própria (2022).

A avaliação dos níveis de maturidade contribui para avaliar quais as dimensões centrais, e subdimensões associadas, contribuirão para que a organização consiga atingir avanços significativos na implantação de tecnologias da Indústria 4.0. Na etapa de análise do retorno do investimento poderá ser feito uso da ferramenta \$AVEPI, que é um aplicativo livre desenvolvido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná — campus Pato Branco, e está disponível no site da instituição (LIMA *et al.*, 2017). O \$AVEPI gera todos os indicadores relacionados a análise de riscos e retorno. Após as etapas de definição das dimensões principais, análise do retorno econômico, tem-se a etapa de definição dos indicadores que acompanharão a implantação do(s) projeto(s) definido(s).

3.1.4 Análise de dados

As entrevistas foram transcritas individualmente para formação do banco de dados da pesquisa. A análise dos dados ocorreu seguindo a método de Análise de Conteúdo de Bardin, visto que reúne um conjunto de técnicas de análise das comunicações, que tem por objetivo a superação da incerteza e o enriquecimento da leitura e que uma leitura atenta pode aumentar a produtividade e pertinência da mensagem (BARDIN, 2016).

Com isso, buscou-se estabelecer as relações entre as respostas e as categorias de análise estabelecidas a priori conforme o estudo da literatura e das pesquisas de base, bem como eventuais categorias identificadas a posteriori conforme a análise dos dados (BARDIN, 2016)

3.2 Obtenção da informação

Nesta etapa, serão descritas as etapas propostas para obtenção da informação e ranqueamento dos MMs apresentados.

3.2.1 Definição dos critérios

Para escolha do melhor modelo de maturidade em Indústria 4.0, utilizou-se o método AHP seguido da aplicação do método Fuzzy TOPSIS. Dessa forma, foram obedecidos os passos conforme descrito na seção 2.5.

Com relação aos critérios, a definição foi elaborada pelo autor e baseada na análise da literatura e nos MMs avaliados na seção 2.3. Os critérios foram definidos conforme abaixo:

- Critério 1 – **Perspectiva PME**. Como o objetivo do trabalho é avaliar a maturidade voltada para PMEs, é necessário verificar se o modelo avaliado apresenta alguma perspectiva/foco voltada para PMEs (CECIMO, 2011; HUANG *et al.*, 2013; RAFAEL *et al.*, 2020);
- Critério 2 – **Ferramentas de avaliação disponíveis**. Não faz parte do escopo deste trabalho criar ou adaptar um questionário para medir o nível de maturidade em Indústria 4.0. Dessa forma, é essencial que a metodologia do autor esteja bem esclarecida e embasada e a ferramenta de avaliação esteja disponível.

Podem ser qualitativas ou quantitativas, por exemplo, usando questionários baseados em *Likert* e modelos de pontuação (MITTAL *et al.*, 2018; RAFAEL *et al.*, 2020);

- Critério 3 – **Quantidade de níveis de maturidade**. Neste critério, quanto menor for a quantidade de níveis de maturidade proposto pelo modelo, menor será o nível de precisão em relação à realidade da PME (AKDIL *et al.*, 2018; MITTAL *et al.*, 2018). Dessa forma, a partir do diagnóstico do nível de maturidade atual, a PME pode decidir aplicar novas tecnologias e melhorias. Se o modelo tiver poucos níveis, provavelmente a PME pode continuar no mesmo nível após as mudanças e não perceber nenhum tipo de avanço. Por outro lado, se o modelo contiver mais níveis de maturidade, a empresa conseguirá perceber avanços graduais, a partir das melhorias implementadas;
- Critério 4 – **Estrutura das perguntas**. Neste critério, leva-se em consideração a forma como as perguntas são construídas (WIESNER *et al.*, 2018). É necessário que elas sejam de fácil entendimento e que as suas respostas estejam estruturadas de forma hierárquica, ou seja, de acordo com os níveis de maturidade propostos na metodologia. Além disso, instrumento de pesquisa não deve conter muitas perguntas de “sim” ou “não”, pois isso dificulta a mensuração da maturidade;
- Critério 5 – **Respostas com descrição de cada nível de maturidade**. Com os níveis descritos para cada dimensão, o preenchimento do questionário torna-se mais objetivo para o entrevistado, uma vez que ele consegue visualizar as características requeridas e posicionar corretamente a empresa em relação àquele aspecto (LICHTBLAU *et al.*, 2015).

3.2.2 Avaliação dos critérios pelos especialistas

Os critérios são comparados par a par, de acordo com a escala fundamental de Saat (Quadro 3), e a partir dos julgamentos é constituída uma matriz de comparação. Esta matriz é a base para o cálculo das importâncias relativas dos diferentes critérios. É colocado o valor 1 na diagonal principal da matriz, uma vez que cada critério representa a mesma importância consigo mesmo, e segue o procedimento de comparação par a par para os outros, onde os elementos seguem a Equação (21), isto é, as comparações são recíprocas.

$$a_{ij} = 1/a_{ji} \quad (21)$$

Tal importância relativa é calculada seguindo a metodologia proposta por Saaty, já demonstrada no Item 2.5 deste trabalho. De forma resumida tem-se:

Cálculo do autovetor e normalização do autovetor, Equações (1) e (2), cálculo do Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC), Equações (3) e (4), onde, sendo o valor de RC < 10% têm-se os pesos dados aos critérios coerentes não sendo necessária uma nova avaliação.

O objetivo principal desta etapa é validar a importância dos critérios definidos na seção 3.1.1 na organização em que o framework está sendo aplicado. Os critérios abordam diferentes áreas, sendo assim, essa análise deve ter por resultado uma avaliação única e consensual dentro da organização.

3.2.3 Ranqueamento dos Modelos de Maturidade

A etapa de ranqueamento dos MMs foi realizado com a aplicação do método *Fuzzy TOPSIS* seguindo as etapas mencionadas na seção 2.6.

A informação para aplicação do Método foi obtida de fontes distintas sendo: critérios e seus respectivos graus de importância avaliados durante a etapa de aplicação do AHP, e as informações de cada MM analisado com o intuito de avaliar a aderência aos critérios do estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o desenvolvimento proposto, foi realizada a aplicação da ferramenta com o objetivo de demonstrar sua eficiência no suporte à problemática de aplicação nas PMEs.

4.1 Escolha do modelo a ser utilizado

Para a aplicação do *framework*, foi adotado o conceito de PME utilizado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), órgão do Governo Federal cujo principal objetivo é o financiamento de longo prazo e investimentos em todos os segmentos da economia brasileira. O BNDES adota a classificação conforme a Tabela 5, abaixo.

Tabela 5 - Classificação PME segundo o BNDES

Classificação	Receita Operacional Bruta Anual ou Renda Anual
Microempresa	≤ R\$ 360 mil
Pequena empresa	> R\$ 360 mil e ≤ R\$ 4,8 milhões
Média empresa	> R\$ 4,8 milhões e ≤ R\$ 300 milhões
Grande empresa	> R\$ 300 milhões

Fonte: BNDES, 2018

Ainda, segundo a Comissão Europeia, as PMEs podem ser definidas como as empresas que empregam menos de 250 trabalhadores e apresentam um volume de negócios anual de até 50 milhões de euros e/ou um receita operacional bruta anual não superior a 43 milhões de euros (MITTAL *et al.*, 2018).

Na aplicação, foram coletadas informações de uma organização na região sudoeste do Estado do Paraná, que atua nas seguintes áreas: laminados de alumínio, utensílios domésticos e uma *trading*. A unidade de análise produz utensílios domésticos, atualmente 900 mil unidades por mês e conta com nove linhas produtivas. A empresa está realizando uma série de investimentos para melhoria de seus processos organizacionais e produtivos, e neste momento se faz necessária a busca por tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 bem como a análise do estágio atual das tecnologias disponíveis. Recentemente a organização realizou investimentos na

aquisição de robôs para algumas de suas linhas produtivas, e atualmente está em processo de migração de seu sistema ERP.

O resultado desta avaliação consistirá na determinação do estágio atual de evolução em que a organização se encontra, em relação as tecnologias da Indústria 4.0. Esse resultado poderá viabilizar um *roadmap* de implementação contendo ações e estratégias de avanço para direcionar a organização no avanço para a Indústria 4.0.

4.1.1 Avaliação dos Critérios – Método AHP

Nesta etapa, foi realizado o estabelecimento de prioridades para os critérios principais, associando pesos relativos a eles e gerando uma matriz recíproca de comparação pareada, tendo como base a escala fundamental de Saaty (Quadro 3).

Foram conduzidas reuniões no formato de *workshops*, que contaram com a participação dos gestores das áreas comercial, administrativa, financeira, logística e industrial, totalizando cinco gestores da organização. Nas reuniões foram apresentados os critérios propostos, sanadas eventuais dúvidas acerca dos critérios e apresentada a metodologia AHP. Ainda, fomentou-se uma série de discussões com o objetivo de que se chegasse a uma matriz final de julgamentos que representasse o consenso obtido pelos gestores da organização. O resultado pode ser visto na Tabela 6:

Tabela 6 - Matriz de Julgamentos

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	1	3	7	3
C2	1	1	5	3	3
C3	1/3	1/5	1	3	5
C4	1/7	1/3	1/3	1	1/5
C5	1/3	1/3	1/5	5	1
Total:	2,81	2,87	9,53	19,00	12,20

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 7 apresenta os resultados do cálculo da matriz normalizada.

Tabela 7 - Cálculo do vetor de prioridades

	C1	C2	C3	C4	C5	Pesos
C1	1	1	3	7	3	0,327
C2	1	1	5	3	3	0,327
C3	1/3	1/5	1	3	5	0,172
C4	1/7	1/3	1/3	1	1/5	0,054
C5	1/3	1/3	1/5	5	1	0,120
Total:	2,81	2,87	9,53	19,00	12,20	1

Fonte: Autoria própria (2022).

Cálculo do Índice de Consistência (IC) conforme Equação (2).

$$IC = \frac{5,295 - 5}{5 - 1} = 0,0738$$

Cálculo da Razão de Consistência (RC) conforme Equação (3).

$$RC = \frac{0,0738}{1,11} = 6,65\%$$

Como o valor de RC é menor que 10%, então, os pesos dados aos critérios estão coerentes.

A partir dos resultados encontrados, observa-se que o Critério 1 (Perspectiva PME) foi o que apresentou maior peso (0,327), seguido pelo Critério 2 (Ferramentas de avaliação disponíveis) com peso idêntico (0,327). Estes valores são coerentes, uma vez que nesse estudo busca-se avaliar a perspectiva de uma PME, e sem o questionário não seria possível aplicar o modelo de maturidade em Indústria 4.0.

4.1.2 Ranqueamento dos Modelos de Maturidade – Método *Fuzzy* TOPSIS

O método *Fuzzy* TOPSIS foi empregado para finalmente propor, de maneira simulada, qual o MM ideal de acordo com a PME. Para isso, foram utilizados os critérios obtidos a partir do Método AHP. Pode-se esquematizar a relação variável linguística e números *fuzzy* conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Variável linguística e números *Fuzzy*

Variável Linguística (grau de importância na decisão)	Números Fuzzy
Muito Baixa (MB)	(1,1,3)
Baixa (B)	(1,3,5)
Média (M)	(3,5,7)
Alta (A)	(5,7,9)
Muito Alta (MA)	(7,9,9)

Fonte: Autoria própria (2022)

De modo a manter a integridade das informações, definiu-se que os critérios com peso maior que 0,30 seriam de importância Muito Alta (MA), os critérios com peso entre 0,15 e 0,30 seriam de Importância Alta (A) e os critérios com pesos menores que 0,15 seriam de Importância Média (M). A Tabela 9 representa as definições.

Tabela 9 - Critérios x Variável linguística x Números Fuzzy

Critérios	Peso	Variável Linguística	Números Fuzzy
Perspectiva PME (C1)	0,327	Muito Alta (MA)	(7,9,9)
Ferramentas de avaliação disponíveis (C2)	0,327	Muito Alta (MA)	(7,9,9)
Quantidade de níveis de maturidade (C3)	0,1172	Alta (A)	(5,7,9)
Estrutura das perguntas (C4)	0,0540	Média (M)	(3,5,7)
Respostas com descrição de cada nível de maturidade (C5)	0,1200	Média (M)	(3,5,7)

Fonte: Autoria própria (2022)

Definidos os números *fuzzy* dos critérios, utilizou-se as informações de cada MM analisado, a fim de avaliar a aderência de cada MM ao critério da etapa anterior. A Tabela 10 ilustra a relação entre cada variável linguística e o número *fuzzy*.

Tabela 10 - Variável linguística x Números Fuzzy

Variável Linguística (atendimento do critério pelo MM)	Números <i>Fuzzy</i>
Não menciona (NM)	(1,1,3)
Menciona superficialmente (MS)	(1,3,5)
Menciona (M)	(3,5,7)
Menciona Parcialmente (MP)	(5,7,9)
Menciona de forma completa (MC)	(7,9,9)

Fonte: Autoria própria (2022).

Para o desenvolvimento desta etapa, foi considerada a configuração apresentada no Quadro 6 para utilização nas etapas de aplicação, onde os MMs são as alternativas que avaliadas em cada análise.

Quadro 6 - Artigos e nomenclaturas do MM

Artigo	Autores	Modelo de Maturidade
<i>Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice</i>	Wagire et al., 2020	M1

<i>An Industry 4.0 maturity model proposal</i>	Santos e Martinho, 2019	M2
<i>A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era</i>	Colli <i>et al.</i> , 2019	M3
<i>Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defense sector</i>	Bibby e Dehe, 2018	M4
<i>Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0</i>	Ganzarain e Errasti, 2016	M5
<i>Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains</i>	Asdecker e Felch, 2018	M6
<i>A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management</i>	Caiado <i>et al.</i> , 2020	M7
<i>A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises</i>	Rauch <i>et al.</i> , 2020	M8
<i>An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies</i>	Rafael <i>et al.</i> , 2020	M9
<i>Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research</i>	Pirola, Cimini e Pinto, 2019	M10

Fonte: Autoria própria (2022).

A variável linguística definida conforme Tabela 10 avalia os MMs e o grau com que o critério estabelecido na etapa anterior é mencionado no MM apresentado. Para o critério Quantidade de níveis de maturidade (C3), por se tratar de um critério quantitativo, foi definido pelo autor que o MM que apresenta maior quantidade de níveis de maturidade terá a melhor avaliação, e o modelo com menor quantidade de níveis de maturidade com a avaliação mais baixa. A Figura 7 ilustra como cada modelo foi avaliado, o Apêndice 3 contém a análise mais detalhada elaborada pelo autor dos MMs avaliados.

Figura 7 - Avaliação dos MMs x Variável linguística

Artigo	Autores	Perspectiva PME	Ferramentas de avaliação disponíveis	Quantidade de níveis de Maturidade	Estrutura das perguntas	Respostas com descrição de cada nível de Maturidade
Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice	Wagire <i>et al.</i>	NM	MP	MC	M	MC

Fonte: Autoria própria (2022)

A Tabela 11 mostra as avaliações em variável linguística, ao passo que a Tabela 12 traduz as informações da Tabela 11 para números *Fuzzy*.

Tabela 11 – Avaliações em variável linguística

Modelos de Maturidade	C1	C2	C3	C4	C5
M1	NM	MP	MC	M	MC
M2	NM	MC	MP	MC	MC
M3	NM	NM	M	NM	NM
M4	NM	MC	NM	MC	MC
M5	NM	NM	NM	NM	NM
M6	NM	MP	NM	M	MC
M7	NM	NM	NM	NM	NM
M8	MC	NM	MS	NM	NM
M9	MC	MP	MP	M	MC
M10	MC	MC	M	MC	MC

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 12 – Avaliações em números fuzzy

Modelos de Maturidade	C1	C2	C3	C4	C5
M1	(1,1,3)	(5,7,9)	(7,9,9)	(3,5,7)	(7,9,9)
M2	(1,1,3)	(7,9,9)	(5,7,9)	(7,9,9)	(7,9,9)
M3	(1,1,3)	(1,1,3)	(3,5,7)	(1,1,3)	(1,1,3)
M4	(1,1,3)	(7,9,9)	(1,1,3)	(7,9,9)	(7,9,9)
M5	(1,1,3)	(1,1,3)	(1,1,3)	(1,1,3)	(1,1,3)
M6	(1,1,3)	(5,7,9)	(1,1,3)	(3,5,7)	(7,9,9)
M7	(1,1,3)	(1,1,3)	(1,1,3)	(1,1,3)	(1,1,3)
M8	(7,9,9)	(1,1,3)	(1,3,5)	(1,1,3)	(1,1,3)
M9	(7,9,9)	(5,7,9)	(5,7,9)	(3,5,7)	(7,9,9)
M10	(7,9,9)	(7,9,9)	(3,5,7)	(7,9,9)	(7,9,9)

Fonte: Autoria própria (2022)

Seguindo os passos do Método *Fuzzy* TOPSIS, a matriz de decisão *Fuzzy* (\tilde{D}) é normalizada conforme a Equação 10. Todos os critérios foram definidos como critérios de benefício. A Tabela 13 mostra a normalização da matriz de decisão *Fuzzy* (\tilde{D}), utilizando-se das Equações 11 e 12.

Tabela 13 - Matriz de Decisão Fuzzy (\tilde{D}) normalizada

Modelos de Maturidade	C1	C2	C3	C4	C5
M1	(0.33,0.33,1)	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)	(0.43,0.71,1)	(0.78,1,1)
M2	(0.33,0.33,1)	(0.78,1,1)	(0.56,0.78,1)	(0.78,1,1)	(0.78,1,1)
M3	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)	(0.43,0.71,1)	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)
M4	(0.33,0.33,1)	(0.78,1,1)	(0.33,0.33,1)	(0.78,1,1)	(0.78,1,1)
M5	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)
M6	(0.33,0.33,1)	(0.56,0.78,1)	(0.33,0.33,1)	(0.43,0.71,1)	(0.78,1,1)
M7	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)
M8	(0.78, 1, 1)	(0.33,0.33,1)	(0.20,0.60,1)	(0.33,0.33,1)	(0.33,0.33,1)
M9	(0.78, 1, 1)	(0.56,0.78,1)	(0.56,0.78,1)	(0.43,0.71,1)	(0.78,1,1)
M10	(0.78, 1, 1)	(0.78,1,1)	(0.43,0.71,1)	(0.78,1,1)	(0.78,1,1)

Fonte: Autoria própria (2022)

Na sequência, o passo de ponderação da matriz de decisão Fuzzy (\tilde{D}) normalizada é iniciado, ou seja, os pesos dos critérios (Tabela 9) são multiplicados pelos valores da matriz de decisão Fuzzy (\tilde{D}) normalizada. Os cálculos para se encontrar a matriz de decisão Fuzzy normalizada ponderada (\tilde{V}) seguem as equações 13 e 14. As duas últimas linhas da Tabela 14 também apresentam, de acordo com a equação 15, os valores da solução ideal positiva (*Fuzzy Positive Ideal Solution, FPIS, A⁺*), e da solução ideal negativa (*Fuzzy Negative Ideal Solution, FNIS, A⁻*). Sendo assim, têm-se a Tabela 14 representando a matriz (\tilde{V}) e os valores de A^+ e A^- .

Tabela 14 - Matriz de decisão Fuzzy normalizada e ponderada (\tilde{V})

Modelos de Maturidade	C1	C2	C3	C4	C5
M1	(2.33,3,9)	(3.89,7,9)	(3.89,7,9)	(1.29, 3.57,7)	(2.33,5,7)
M2	(2.33,3,9)	(5.44,9,9)	(2.78,5.44,9)	(2.33,5,7)	(2.33,5,7)
M3	(2.33,3,9)	(2.33,3,9)	(2.14,5,9)	(1,1.67,7)	(1,1.67,7)
M4	(2.33,3,9)	(5.44,9,9)	(1.67,2.33.9)	(2.33,5,7)	(2.33,5,7)
M5	(2.33,3,9)	(2.33,3,9)	(1.67,2.33.9)	(1,1.67,7)	(1,1.67,7)
M6	(2.33,3,9)	(3.89,7,9)	(1.67,2.33.9)	(1.29,3.57,7)	(2.33,5,7)
M7	(2.33,3,9)	(2.33,3,9)	(1.67,2.33.9)	(1,1.67,7)	(1,1.67,7)
M8	(5.44,9,9)	(2.33,3,9)	(1,4.20,9)	(1,1.67,7)	(1,1.67,7)
M9	(5.44,9,9)	(3.89,7,9)	(2.78,5.44,9)	(1.29,3.57,7)	(2.33,5,7)
M10	(5.44,9,9)	(5.44,9,9)	(2.14,5,9)	(2.33,5,7)	(2.33,5,7)
A ⁺	(5.44,9,9)	(5.44,9,9)	(3.89,7,9)	(2.33,5,7)	(2.33,5,7)
A ⁻	(2.33,3,9)	(2.33,3,9)	(1,2.33,9)	(1,1.67,7)	(1,1.67,7)

Fonte: Autoria própria (2022)

Assim, utilizando as equações 17 e 18, calcula-se as distâncias de cada alternativa em relação a A^+ e A^- , bem como os somatórios acumulados, definidos como D_i^+ e D_i^- , das distâncias em relação a A^+ e A^- respectivamente. A Tabela 15 demonstra os valores relacionados a A^+ e a Tabela 16 representa os valores relativos a A^- .

Tabela 15 - Distância das alternativas em relação a A^+

Modelos de Maturidade	C1	C2	C3	C4	C5	D_i^+
M1	3,90	1,46	0,00	1,02	0,00	6,39
M2	3,90	0,00	1,10	0,00	0,00	5,01
M3	3,90	3,90	1,53	2,07	2,07	13,48
M4	3,90	0,00	2,98	0,00	0,00	6,89
M5	3,90	3,90	2,98	2,07	2,07	14,93
M6	3,90	1,46	2,98	1,02	0,00	9,37
M7	3,90	3,90	2,98	2,07	2,07	14,93
M8	0,00	3,90	2,32	2,07	2,07	10,37
M9	0,00	1,46	1,10	1,02	0,00	3,59
M10	0,00	0,00	1,53	0,00	0,00	1,53

Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando a Tabela 15, nota-se que M10 possui a menor distância em relação à solução ideal positiva (A^+) (1.53), o que já pode ser um indicativo de ser esse o MM mais aderente. Por outro lado, a distância em relação à A^+ de M5 e M7 já mostra que há grandes possibilidades desses dois MMs serem os menos aderentes entre os dez analisados, uma vez que quanto mais longe da solução ideal positiva, pior é a alternativa. Os critérios decisivos, delimitando a análise na Tabela 15, foram C1 e C2, uma vez que esses são os critérios com o maior valor, sendo responsáveis proporcionalmente por M5 e M7 possuírem um alto valor em D_i^+ .

A Tabela 16, por outro lado, mostra os valores em relação à solução ideal negativa, ou seja, quanto maior o valor, melhor é a aderência do MM naquele critério. Note-se, mais uma vez, que C1 e C2 são os critérios mais decisivos, já que possuem os maiores valores, elevando a somatória D_i^- de M10, o que corrobora com a tendência de ser M10 o MM mais aderente.

Tabela 16 - Distância das alternativas em relação à A⁻

Modelos de Maturidade	C1	C2	C3	C4	C5	D_i^-
M1	0,00	2,48	3,17	1,11	2,07	8,83
M2	0,00	3,90	2,07	2,07	2,07	10,12
M3	0,00	0,00	1,68	0,00	0,00	1,68
M4	0,00	3,90	0,38	2,07	2,07	8,43
M5	0,00	0,00	0,38	0,00	0,00	0,38
M6	0,00	2,48	0,38	1,11	2,07	6,05
M7	0,00	0,00	0,38	0,00	0,00	0,38
M8	3,90	0,00	1,08	0,00	0,00	4,98
M9	3,90	2,48	2,07	1,11	2,07	11,63
M10	3,90	3,90	1,68	2,07	2,07	13,62

Fonte: Autoria própria (2022)

Definidos D_i^+ e D_i^- , usou-se a equação 20 para encontrar o coeficiente de aproximação (CC_i) e o ranking das alternativas, conforme Tabela 17. Sabendo que os valores de CC_i que mais se aproximam de 1,00 remetem a melhor alternativa, conclui-se que o MM M10 é o melhor para os critérios estudados, seguido pelos MMs M9 e M2. Sendo assim, o MM M10 apresentou melhor desempenho global quando comparado aos demais MMs analisados levando em consideração os critérios Perspectiva PME, Ferramentas de avaliação disponíveis, Quantidade de níveis de maturidade, Estrutura das perguntas e Respostas com descrição de cada nível de maturidade.

Tabela 17 - Coeficiente de aproximação (CC_i) e ranking das alternativas

Modelos de Maturidade	D_i^+	D_i^-	CC_i	Ranking
M10	1,53	13,62	0,90	1
M9	3,59	11,63	0,76	2
M2	5,01	10,12	0,67	3
M1	6,39	8,83	0,58	4
M4	6,89	8,43	0,55	5
M6	9,37	6,05	0,39	6
M8	10,37	4,98	0,32	7
M3	13,48	1,68	0,11	8
M5	14,93	0,38	0,03	9
M7	14,93	0,38	0,03	9

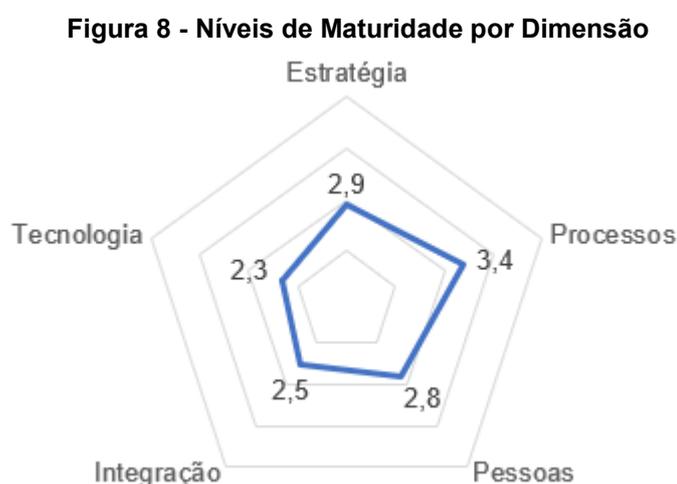
Fonte: Autoria própria (2022).

Com base nos resultados e no ranqueamento dos MMs, tem-se a etapa de avaliação do nível de maturidade da Indústria 4.0 dentro da organização. A implementação de novos sistemas com elevado impacto no trabalho dos colaboradores requer uma organização flexível com grande capacidade de adaptação à mudança e com processos de gestão preparados para tal. Nesta etapa, o *roadmap* proposto neste trabalho se torna ferramenta essencial para apoiar a organização na aplicação das principais ferramentas e pontos levantados.

4.2 Aplicação do Modelo Escolhido

O modelo escolhido foi dos autores Pirola, Cimini e Pinto (2019). A primeira etapa consistiu na tradução do questionário (Apêndice 4) e, em seguida, foi dado início ao processo de aplicação. Foram conduzidas reuniões com os gestores das áreas administrativa, financeira, controladoria, comercial e marketing, logística, industrial, suprimentos, planejamento e T.I. O questionário, com 45 questões, foi preenchido juntamente com os gestores para sanar possíveis dúvidas durante a aplicação.

O resultado geral de maturidade da companhia em relação a Indústria 4.0 foi de 2,8 em uma pontuação máxima de cinco. O nível de maturidade encontrado significa que a organização tem se aproximado do caminho para a Indústria 4.0 e a digitalização de seus processos, mas ainda há espaço para melhorias. Mais percepções podem ser obtidas olhando para as diferentes dimensões, mostradas na Figura 8.



Fonte: Autoria própria (2022).

A análise das cinco categorias mostra que “processos” é a dimensão mais madura. Um dos pontos chave da Indústria 4.0 é a disponibilidade de uma grande quantidade de dados de diferentes áreas, permitindo efetivamente que a empresa monitore processos e tomar decisões mais informadas. Assim, esta área analisa a forma como os dados são recolhidos, partilhados e geridos dentro da empresa, bem como a forma como são gerenciados os principais processos internos.

Os principais dados levantados são aqueles relacionados ao tempo de produção, disponibilidade, estoque e aos defeitos gerados durante o processo produtivo. Esses dados são usados principalmente para monitorar o desempenho e a qualidade do sistema de produção, enquanto a aplicação de previsão, otimização e manutenção preditiva permanece ausente. No entanto, a empresa está atualmente investindo neste campo para aumentar a quantidade de dados registrados dos processos de produção e para melhorar a forma como esses dados são gerenciados.

A segunda dimensão com maior valor é “estratégia”. Esta dimensão envolve o investimento em pesquisa e desenvolvimento, a definição de uma estratégia para a Indústria 4.0 e o comprometimento da alta administração. O investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) situa-se entre 1 e 5 por cento da receita. A empresa tem uma estratégia da Indústria 4.0 em vigor, mesmo não tendo roteiros e caminhos definidos para a implementação dos princípios da Indústria 4.0. Este dado é confirmado pelo fato de que a empresa está investindo em produtos e tecnologias relacionadas com a Indústria 4.0. Além disso, declara que o comprometimento da alta administração é elevado, representando um passo positivo para uma implementação bem-sucedida. No entanto, ao analisar as principais barreiras à implementação de uma estratégia da Indústria 4.0, a empresa declara que a principal dificuldade é não ter um plano de ação. Isso pode estar relacionado ao fato de a empresa estar iniciando seu rumo na Indústria 4.0, mas ainda está definindo suas estratégias.

Um dos principais fatores-chave na definição e implementação de estratégias de sucesso é o nível de competência das pessoas envolvidas no processo de decisão e implementação. Com relação a terceira dimensão “pessoas” a empresa carece de conhecimento sobre as principais tecnologias da Indústria 4.0, especialmente robótica, automação, *Big Data*, Internet das coisas (*IoT*) e sistemas ciberfísicos (CPS). Por esta razão, ela deve estabelecer ações de qualificação e requalificação para permitir que os funcionários explorem o potencial das novas tecnologias.

A quarta dimensão analisada é a “integração”, tanto vertical quanto horizontal, sendo considerados os sistemas de informação implantados na empresa e seu nível de integração. Assim, considerando o ERP como o núcleo da empresa, pressupõe-se que a integração vertical é alcançada quando todos os sistemas de informação estão integrados a ela, ou seja, trocam dados de forma bidirecional.

Para tanto, analisou-se quais sistemas de informação são utilizados na empresa e se estão integrados ao ERP. O resultado demonstra que os diferentes departamentos ainda atuam como silos separados e que há espaço para melhorias para se obter um compartilhamento e integração interna mais eficiente. Além disso, o Sistema de Execução de Manufatura (MES) está em fase final de implementação, significando que o chão de fábrica é gerenciado com base na experiência dos funcionários e o desempenho é difícil de monitorar continuamente e em tempo real. O sistema de comércio eletrônico existe e em um nível inicial, ou seja, ainda depende principalmente da venda tradicional.

A integração com clientes e fornecedores ao nível da comunicação e partilha de informação é muito limitada. Apenas alguns clientes e fornecedores têm um sistema de intercâmbio eletrônico de dados em funcionamento, tendo a grande maioria de clientes e fornecedores o acesso comum via e-mail e telefone.

Com relação a dimensão “tecnologia”, o desconhecimento das principais tecnologias está estritamente relacionado ao grau de adoção dessas tecnologias. A empresa ainda aproveita os sistemas de manufatura tradicionais, caracterizados por altos níveis de automação, mas adota a interface homem-máquina tradicional que os fornecedores das máquinas fornecem para ler as informações da máquina. Em relação à robótica, costuma utilizar a robótica tradicional para movimentar produtos e componentes em suas linhas de produção.

A empresa possui sistemas de rastreabilidade para identificar produtos e componentes durante o processo de produção e / ou após a venda do produto. Em particular, usa códigos de barras para rastrear lotes de produtos acabados e componentes e não usa RFID. A empresa mantém os dados armazenados em servidores internos e não explora serviços analíticos de nuvem, nos quais um usuário envia dados para um provedor e o *hardware* do provedor executa as ações necessárias para os dados (ou seja, análise de dados) e, em seguida, envia de volta os resultados.

Com base nos pontos levantados durante a aplicação do MM escolhido, a empresa optou pela aplicação do *roadmap* nos pontos em que o nível de maturidade foi mais baixo, ou seja, a visão estratégica da empresa foi a de equilibrar o nível de maturidade das dimensões analisadas antes de desenvolver aquelas que atualmente encontram-se em estágio mais avançado. Dessa forma, as dimensões “Tecnologia”, “Integração” e “Pessoas”, foram as dimensões escolhidas para aplicação do *roadmap*. Por questões de sigilo, a empresa optou por não autorizar a publicação dos planos de ação na íntegra, sendo assim, nos próximos parágrafos será dada uma visão geral das ações construídas através da aplicação do *roadmap*.

Com relação à dimensão “Pessoas” a empresa promoveu uma alteração em sua estrutura, de forma de antes existia apenas o departamento de Recursos Humanos (RH), responsável pela parte documental, desenvolvimento de pessoas e rotinas administrativas. Com a nova estrutura, foi criado um departamento de Desenvolvimento Humano e Organizacional (DHO) e as responsabilidades de cada área foram redefinidas sendo a área de RH responsável pelas rotinas burocráticas de documentação e rotinas administrativas pertinentes.

Com a área de DHO, cabe a responsabilidade de contribuir com a valorização dos colaboradores, e o aperfeiçoamento de suas competências individuais através de uma abordagem humanizada, para ir além dos aspectos puramente profissionais levando em consideração também as qualidades psicossociais e emocionais de cada indivíduo. Com foco no desenvolvimento da Indústria 4.0 o DHO trabalhará com as seguintes premissas: processos de treinamento e capacitação mais eficientes, redução da rotatividade versus maior retenção de profissionais, atração de talentos cada vez mais qualificados, avaliação das competências dos profissionais mais antigos e disseminação de novos conhecimentos e processos de capacitação frequentes.

Com relação às dimensões “Tecnologia” e “Integração”, a empresa optou por um conjunto de soluções que atendesse as duas dimensões ao mesmo tempo em um primeiro momento. Como espinha dorsal dessa transformação, a empresa realizou a aquisição e, conseqüentemente, a implantação de um novo sistema ERP da empresa alemã SAP, considerado o ERP mais avançado do mundo na atualidade. Com esse novo sistema, uma série de melhorias foram implementadas, desde a aquisição/implantação de novos sistemas para suportar a operação em áreas de apoio, bem como a compra de máquinas e equipamentos de última geração.

Com a implantação do novo sistema ERP e dos sistemas legados, além de automatizar grande parte do processo de integração o sistema é capaz de controlar dados e informações cruciais sobre produtividade, vendas, faturamento em uma única ferramenta. Dessa forma, os gestores têm acesso a informações precisas sobre a performance de cada etapa do processo.

5 CONCLUSÃO

A avaliação de maturidade de processos e empresas é fundamental no direcionamento de estratégias que possam desencadear ações de melhoria dentro das organizações. Estas ações poderão garantir a manutenção e elevação do potencial competitivo das organizações no contexto de mercado atual, que é altamente dinâmico e volátil, mais ainda quando se trata de PMEs inseridas no contexto da Indústria 4.0.

O presente trabalho buscou desenvolver um *framework* para auxiliar as PMEs na escolha do modelo de maturidade para avaliação de seu atual estágio de desenvolvimento em Indústria 4.0, e que as auxiliasse na aplicação de estratégias de implementação de suas tecnologias. Este projeto buscou responder aos problemas de pesquisa propostos que são: o atendimento as necessidades das PMEs pelos MMs atualmente disponíveis, e como avaliar o nível de maturidade de uma PME com base em seus requisitos específicos.

A primeira etapa do estudo, portanto, compreendeu a identificação, na literatura científica, dos principais modelos de maturidade em Indústria 4.0. Para tanto, foi necessário contextualizar a Indústria 4.0, suas tecnologias habilitadoras e identificar os modelos de avaliação de maturidade predominantes. Para tal, foram apresentados e discutidos os conceitos de sistemas ciber-físicos (CPS), *Big Data*, Internet das Coisas e computação em nuvem. Em seguida, com objetivo de aquisição do conhecimento relacionado a avaliação de maturidade, foram analisados modelos relevantes da literatura.

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado em uma PME na região sudoeste do Paraná. Para escolha do modelo de maturidade que melhor se enquadrava no contexto da empresa, foram estabelecidos critérios e utilizado o método AHP para ranquear os critérios de acordo com a necessidade de organização. Nesta etapa, os critérios Perspectiva PME e Ferramentas de avaliação disponíveis foram os que obtiveram os pesos mais altos sendo 35,8 e 33,5 respectivamente. Posteriormente, foi utilizado o método *Fuzzy TOPSIS* para ranqueamento dos MMs obtidos na etapa de revisão de literatura. O modelo selecionado foi o proposto por Pirola, Cimini e Pinto (2019) e busca avaliar a prontidão e maturidade das PMEs italianas e, além de apresentar a ferramenta de avaliação de maturidade, é específico

para PMEs e aborda diferentes modelos de negócios e não apenas determinados segmentos específicos

Para sua aplicação, foram conduzidas reuniões com as áreas de comercial, logística, industrial, financeiro, suprimentos e T.I. da empresa analisada. O resultado geral de maturidade encontrado na empresa foi de 2,8 de um valor máximo possível de cinco, sendo considerada “Intermediária” em relação a Indústria 4.0 na escala proposta pelos autores.

Este trabalho se propôs a contribuir com os cenários acadêmico, econômico e social. Na área acadêmica, por meio da revisão de literatura, foram levantados os modelos de maturidade existentes, mapeadas as características e os componentes relevantes da Indústria 4.0. Outro fator de contribuição para a área acadêmica refere-se à possível utilização do modelo proposto por outros pesquisadores.

No âmbito econômico, este trabalho aplicado possibilita uma maior visibilidade das empresas no contexto da Indústria 4.0, incentivando o desenvolvimento de seus conceitos de forma mais ampla. Por fim, quanto ao cenário social, este trabalho traz uma elucidação para a sociedade sobre os conceitos da Indústria 4.0, trazendo à tona suas características e seus componentes essenciais.

Como trabalhos futuros, sugere-se a aplicação do *framework* em outras empresas, de diferentes segmentos de negócios, com a consulta e avaliação de novos especialistas de forma a ampliar a visão com relação ao problema. Pode-se, dessa forma, analisar os resultados do modelo de acordo com diferentes segmentos empresariais identificando as suas respectivas visões relacionadas à Indústria 4.0. A inserção de novos MMs seria interessante para trazer novas abordagens ao problema, contribuindo para o desenvolvimento de novas metodologias.

REFERÊNCIAS

- ALBLIWI, S. A.; ANTONY, J.; ARSHED, N. **Critical literature review on maturity models for business process excellence**. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. **Anais...IEEE Computer Society**, 2014
- ALQAHTANI, A. Y.; GUPTA, S. M.; NAKASHIMA, K. Warranty and maintenance analysis of sensor embedded products using internet of things in industry 4.0. **International Journal of Production Economics**, v. 208, p. 483–499, fev. 2019.
- AMARAL, A.; PEÇAS, P. SMEs and Industry 4.0: Two case studies of digitalization for a smoother integration. **Computers in Industry**, v. 125, p. 103333, 1 fev. 2021.
- ARNOLD, C.; KIEL, D.; VOIGT, K.-I. HOW THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS CHANGES BUSINESS MODELS IN DIFFERENT MANUFACTURING INDUSTRIES. **International Journal of Innovation Management (ijim)**, v. 20, n. 08, p. 1–25, 1 dez. 2016.
- ASDECKER, B.; FELCH, V. **Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains**. [s.l: s.n.]. v. 13
- BAUM, G. Innovationen als Basis der nächsten Industrierevolution. In: [s.l.] Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013. p. 37–53.
- BENBASAT, I. et al. A Critique of the Stage Hypothesis: Theory and Empirical Evidence. **Communications of the ACM**, v. 27, n. 5, p. 476–485, 1 maio 1984.
- BIBBY, L.; DEHE, B. Defining and assessing industry 4.0 maturity levels—case of the defence sector. **Production Planning and Control**, v. 29, n. 12, p. 1030–1043, 2018.
- BMBF. **Zukunftsbild “Industrie 4.0”**. [s.l: s.n.].
- BRETTEL, M. et al. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, v. 8, n. 1, 2014.
- BRUTON, K. et al. **IAMM: A Maturity Model for Measuring Industrial Analytics Capabilities in Large-scale Manufacturing Facilities**Article in **International Journal of Prognostics and Health Management**. [s.l: s.n.].
- CAIADO, R. G. G. et al. A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. **International Journal of Production Economics**, v. 231, n. November 2019, 2020.
- CENEA, D. et al. Using the SEPT learning factory for the implementation of industry 4.0: Case of SMEs. **Procedia Manufacturing**, v. 45, n. 2019, p. 102–107, 2020.
- CHEN, C. T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 114, n. 1, p. 1–9, 16 ago. 2000.
- COLLI, M. et al. A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. **Annual Reviews in Control**, v. 48, p. 165–177, 2019.
- CORBIN, J.; STRAUSS, A. Basics of Qualitative Research: Techniques and

Procedures for Developing Grounded Theory.

<https://doi.org/10.1177/1094428108324514>, v. 12, n. 3, p. 614–617, 5 set. 2008.

CUKIER, K. A special report on managing information. **The Economist**, v. 394, n. 8671, p. 3–18, 2010.

DE CAROLIS, A. et al. A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies. **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, v. 513, p. 13–20, 2017.

DELOITTE. **Industry 4.0—Challenges and Solutions for the Digital Transformation and Use of Exponential Technologies. Study of Deloitte Consulting**. Disponível em:

<<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2020.

ELMARAGHY, H. Smart changeable manufacturing systems. **Procedia Manufacturing**, v. 28, p. 3–9, 2019.

EROL, S. et al. **Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production**. *Procedia CIRP. Anais...Elsevier B.V.*, 1 jan. 2016

FATORACHIAN, H.; KAZEMI, H. A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. **Production Planning & Control**, v. 29, n. 8, p. 633–644, jun. 2018a.

FATORACHIAN, H.; KAZEMI, H. A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. **Production Planning and Control**, v. 29, n. 8, p. 633–644, 11 jun. 2018b.

FLICK, U. Qualidade na pesquisa qualitativa. p. 196–196, 2009.

FRANÇA, L. V. G. **Modelo de avaliação de impacto ambiental utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy: um estudo de caso para a indústria automobilística**. [s.l.] UNESP - Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2015.

FRANK, A.; DALENOGARE, L.; AYALA, N. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, 2019.

GANDOMI, A.; HAIDER, M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. **International Journal of Information Management**, v. 35, n. 2, p. 137–144, 1 abr. 2015.

GANZARAIN, J.; ERRASTI, N. Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 9, n. 5, p. 1119–1128, 2016.

GÖKALP, E.; ŞENER, U.; EREN, P. E. Development of an assessment model for industry 4.0: Industry 4.0-MM. **Communications in Computer and Information Science**, v. 770, p. 128–142, 2017.

GOMIDE, F., GUDWIN, R., TANSCHKEIT, R. **Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações**. 6th IFSA Congress -São Paulo, Brasil. *Anais...1995*

GUALTIERI, L. et al. **Advanced Automation for SMEs in the I4.0 Revolution: Engineering Education and Employees Training in the Smart Mini Factory Laboratory**. IEEE International Conference on Industrial Engineering and

Engineering Management. **Anais...IEEE Computer Society**, 9 jan. 2019

GUARNIERI, P.; TROJAN, F. Decision making on supplier selection based on social, ethical, and environmental criteria: A study in the textile industry. **undefined**, v. 141, p. 347–361, 1 fev. 2019.

HELLINGER, A.; SEEGER, H. **Cyber-physical Systems Driving Force for Innovation in Mobility, Health, Energy and ProductionAcatech Position Paper, National Academy of Science and Engineering**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/%3E-Cyber-physical-Systems-Driving-Force-for-in-and-Hellinger-Translation/ff04fd6223a26c93098079ca74c7de461f57753a>>. Acesso em: 23 jun. 2022.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios**. 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). **Anais...IEEE**, jan. 2016

HMELO-SILVER, C. E. **Problem-based learning: What and how do students learn?Educational Psychology Review**Springer, , set. 2004. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023/B:EDPR.0000034022.16470.f3>>. Acesso em: 12 set. 2020

HWANG, C.-L.; YOON, K. Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. v. 186, 1981.

IBEF. . [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.ibef.org>. Acesso em: 12 set. 2020.

JESCHKE, S. et al. Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. In: [s.l.] Springer, Cham, 2017. p. 3–19.

JUNIOR, F. R. L.; CARVALHO, G. M. R.; CARPINETTI, L. C. R. A methodology based on fuzzy inference and SCOR model for supplier performance evaluation. **Gestao e Producao**, v. 23, n. 3, p. 515–534, 1 jul. 2016.

KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group**. [s.l.] Forschungsunion, 2013.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0.Acatech**. [s.l.: s.n.].

KANG, H. S. et al. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 3, n. 1, p. 111–128, 1 jan. 2016.

KUNII, T. L. **The 3rd industrial revolution through integrated intelligent processing systems**. 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems (Cat. No.97TH8335). **Anais...IEEE**, 1997Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/672730/>>. Acesso em: 27 maio. 2019

LANZILLOTTI, R. S.; LANZILLOTTI, H. S. Análise sensorial sob o enfoque da decisão fuzzy. **Revista de Nutrição**, v. 12, n. 2, p. 145–157, ago. 1999.

LEE, E. A. **The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on modelsSensors (Switzerland)**MDPI AG, , 26 fev. 2015.

LEGNER, C.; THIESSE, F. **RFID-based maintenance at Frankfurt airportIEEE**

Pervasive Computing, jan. 2006.

LEYH, C. et al. **SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0.** (M. L. Ganzha M. Paprzycki M., Ed.) Proceedings of the 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2016. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85007197274&doi=10.15439%2F2016F478&partnerID=40&md5=8701153e9fc436e568279308a6496bf1>>

LIAO, Y. et al. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609–3629, 18 jun. 2017.

LICHTBLAU, K. et al. **INDUSTRIE 4.0 READINESS.** [s.l: s.n.].

LIMA, J. D. DE; et al. View of \$AV€ – Web System to Support the Teaching and Learning Process in Engineering Economics. **Brazilian Journal of Operations and Production Management**, v. 14, n. 4, p. 469–485, 2017.

MATT, D. T.; RAUCH, E.; FRACCAROLI, D. Designing a holistic production system by industry 4.0 vision in small and medium enterprises (SMEs). **ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb**, v. 111, n. 1–2, p. 52–55, 1 fev. 2016.

MENDES JR., P.; LEAL, J. A.; THOMÉ, A. M. T. A maturity model for demand-driven supply chains in the consumer product goods industry. **International Journal of Production Economics**, v. 179, p. 153–165, set. 2016.

MIGUEL, P. A. C. **Case research in production engineering: structure and recommendations for its conduction Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução.** [s.l: s.n.].

MITTAL, S. et al. A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). **Journal of Manufacturing Systems**, v. 49, p. 194–214, 2018.

MITTAL, S. et al. A smart manufacturing adoption framework for SMEs. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 5, p. 1555–1573, 3 mar. 2020.

MODRAK, V.; MARTON, D.; BEDNAR, S. **Modeling and determining product variety for mass-customized manufacturing.** *Procedia CIRP*. **Anais...**Elsevier B.V., 1 jan. 2014

MOEUF, A. et al. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 3, p. 1118–1136, 1 fev. 2018.

MOLINA, E.; JACOB, E. Software-defined networking in cyber-physical systems: A survey. **Computers & Electrical Engineering**, v. 66, p. 407–419, 1 fev. 2018.

MÜLLER, J. M.; BULIGA, O.; VOIGT, K. I. The role of absorptive capacity and innovation strategy in the design of industry 4.0 business Models - A comparison between SMEs and large enterprises. **European Management Journal**, v. 39, n. 3, p. 333–343, 1 jun. 2021.

NICK, G. et al. Industry 4.0 readiness in manufacturing: Company Compass 2.0, a

renewed framework and solution for Industry 4.0 maturity assessment. **Procedia Manufacturing**, v. 54, p. 39–44, 1 jan. 2021.

NIST. NIST Big Data Interoperability Framework. **NIST**, v. 1, p. 32, 2015.

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina**. [s.l: s.n.].

ORZES, G. et al. **Industry 4.0 Implementation Barriers in Small and Medium Sized Enterprises: A Focus Group Study**. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. **Anais...IEEE Computer Society**, 9 jan. 2019

OSIRO, L.; LIMA JUNIOR, F. R.; CARPINETTI, L. C. R. A fuzzy logic approach to supplier evaluation for development. **International Journal of Production Economics**, v. 153, p. 95–112, 2014.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. **Literature review of Industry 4.0 and related technologies****Journal of Intelligent Manufacturing** Springer, , 1 jan. 2020.

PALLIS, G. **Cloud computing: The new frontier of internet computing****IEEE Internet Computing**, set. 2010.

PIROLA, F.; CIMINI, C.; PINTO, R. Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2019.

POSADA, J. et al. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 35, n. 2, p. 26–40, mar. 2015a.

POSADA, J. et al. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 35, n. 2, p. 26–40, 1 mar. 2015b.

QIN, J.; LIU, Y.; GROSVENOR, R. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 173–178, 1 jan. 2016.

RAFAEL, L. D. et al. An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 159, n. March, p. 120203, 2020.

RAUCH, E. et al. A maturity level-based assessment tool to enhance the implementation of industry 4.0 in small and medium-sized enterprises. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 9, 2020.

REISCHAUER, G. Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize innovation systems in manufacturing. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 26–33, jul. 2018.

ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, v. 6, n. 2, p. 215824401665398, 20 abr. 2016.

RODEN, S. et al. Big data and the transformation of operations models: A framework and a new research agenda. **Production Planning and Control**, v. 28, n. 11–12, p. 929–944, 2017.

SAAD, S. M.; BAHADORI, R.; JAFARNEJAD, H. The smart SME technology readiness assessment methodology in the context of industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, 13 jul. 2021.

- SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1 jan. 1987.
- SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, 5 set. 1990.
- SAATY, T. L. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. **European Journal of Operational Research**, v. 168, n. 2 SPEC. ISS., p. 557–570, 16 jan. 2006.
- SADEEQ, M. M. et al. IoT and Cloud Computing Issues, Challenges and Opportunities: A Review. **Qubahan Academic Journal**, v. 1, n. 2, p. 1–7, 15 mar. 2021.
- SANTOS, R. C.; MARTINHO, J. L. An Industry 4.0 maturity model proposal. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2019.
- SCHMIDT, R. et al. Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results. In: [s.l: s.n.]. p. 16–27.
- SCHUH, G. et al. **Industrie 4.0 Maturity Index Managing the Digital Transformation of CompaniesAcatech StudyStudy**. [s.l: s.n.].
- SCHUH, G. et al. **Industrie 4.0 Maturity Index Managing the Digital Transformation of CompaniesAcatech Study**. [s.l: s.n.].
- SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161–166, 1 jan. 2016.
- SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. [s.l: s.n.].
- SCHWAB, K. The fourth industrial revolution. 2017.
- SEDLER, U. Industrie 4.0– Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (Systems Lifecycle Management). In: [s.l.] Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013. p. 1–19.
- SOMMER, L. Industrial revolution - Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 8, n. 5, p. 1512–1532, 28 nov. 2015.
- SOUZA, T. F. DE; GOMES, C. F. S. Assessment of Maturity in Project Management: A Bibliometric Study of Main Models. **Procedia Computer Science**, v. 55, p. 92–101, jan. 2015.
- TAN, L.; WANG, N. **Future Internet: The Internet of Things**. ICACTE 2010 - 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Proceedings. **Anais...2010**
- THOBEN, K. D.; WIESNER, S. A.; WUEST, T. **“Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examplesInternational Journal of Automation TechnologyFuji Technology Press**, , 2017.
- TÜRKEŞ, M. et al. Drivers and Barriers in Using Industry 4.0: A Perspective of SMEs in Romania. **Processes**, v. 7, n. 3, p. 153, 12 mar. 2019.
- TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **METODOLOGIA DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. [s.l: s.n.].

VYGOTSKY, L. Mind in society: The development of higher psychological processes. 1980.

WAGIRE, A. A. et al. Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. **Production Planning and Control**, v. 0, n. 0, p. 1–20, 2020.

WANG, S. et al. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 2016, 19 jan. 2016a.

WANG, S. et al. Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. **Computer Networks**, v. 101, p. 158–168, jun. 2016b.

WANKHEDE, V. A.; VINODH, S. Analysis of Industry 4.0 challenges using best worst method: A case study. **Computers & Industrial Engineering**, v. 159, p. 107487, 1 set. 2021.

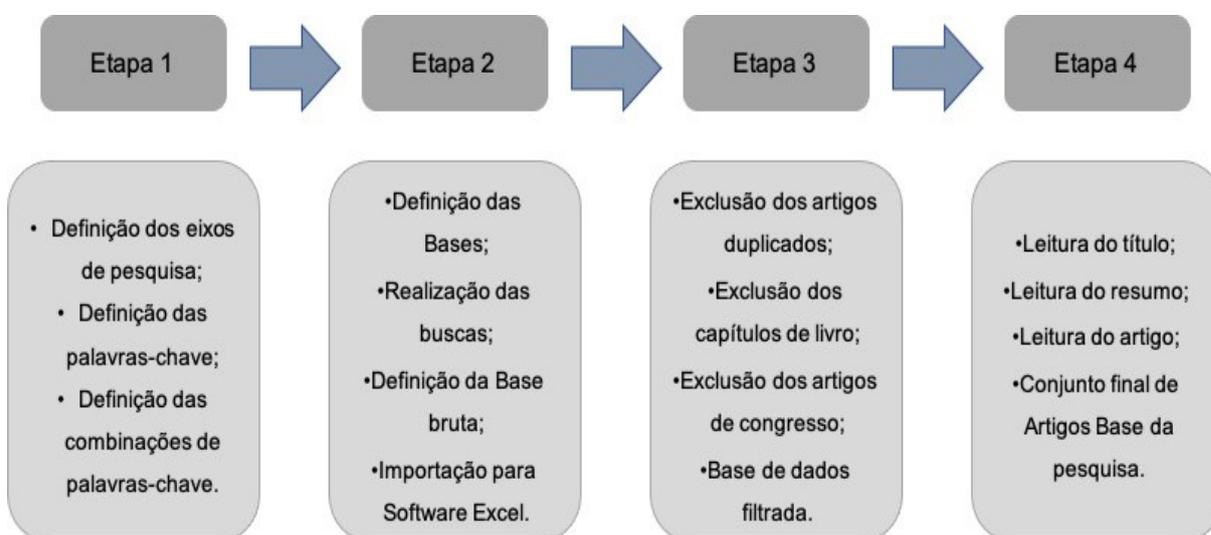
XIA, F. et al. Internet of Things. **INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS Int. J. Commun. Syst.**, v. 25, p. 1101–1102, 2012.

XIONG, G. et al. **Cloud operating system for industrial application**. 2015 IEEE International Conference on Service Operations And Logistics, And Informatics (SOLI). **Anais...IEEE**, nov. 2015

XU, X. From cloud computing to cloud manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 28, n. 1, p. 75–86, 1 fev. 2012.

APÊNDICE A - Protocolo de formação do portfólio dos modelos de maturidade

Para realizar a análise sistemática de literatura sobre o tema proposto, foi utilizado o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), o qual fornece uma biblioteca virtual, com produções científicas internacionais de elevado nível. Para a realização desta pesquisa foram selecionadas as bases *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. A utilização destas bases de dados se justifica através do documento “Considerações sobre o Qualis Periódicos” (2016), onde os periódicos indexados nas bases de dados compõem artigos de maior classificação sobre o tema. Nas bases de dados foi realizado o processo de revisão sistemática de literatura, um processo estruturado, que permite através da combinação de eixos, selecionar artigos nas bases para atender o objetivo proposto desta pesquisa. A Figura abaixo ilustra o processo utilizado.



A primeira etapa consistiu na definição dos eixos de pesquisa, os mesmos foram formados pelos tópicos: Indústria 4.0, Modelos de Maturidade e PMEs. As mesmas foram traduzidas para o inglês: *Industry 4.0*, *Maturity Model* e *SMEs*. Para cada eixo descrito, foram propostas palavras-chave, totalizando doze combinações de palavras-chave, as quais foram pesquisadas com o uso do operador booleano *AND*. Para estabelecer as palavras-chave para as combinações, foi necessário a realização de uma busca prévia para consultar quais palavras estavam sendo utilizadas e, desta forma, construir as combinações, de forma a englobar os principais sinônimos utilizados.

A segunda etapa consistiu na definição nas bases de dados. As pesquisas foram realizadas durante o mês de agosto de 2020 nas bases: *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. Testes para verificar a validade das combinações foram realizados, neste caso, o retorno de artigos dentro do contexto da pesquisa foram positivos. Com o teste validado, foram realizadas buscas nas bases de dados com doze combinações. Abaixo são apresentados o número de artigos de retorno pelas combinações utilizadas.

Combinações	Sci. D.	Sco.	W. o. S.	Total
<i>industry 4.0 AND maturity model AND sme</i>	67	7	2	76
<i>industry 4.0 AND assessment AND sme</i>	440	29	5	474
<i>industry 4.0 AND assessment AND "small and medium enterprises"</i>	477	35	9	521
<i>industry 4.0 AND maturity model AND "small and medium enterprises"</i>	74	6	3	83
<i>smart manufacturing AND maturity model AND sme</i>	33	3	2	38
<i>smart manufacturing AND assessment AND sme</i>	121	10	4	135
<i>smart manufacturing AND assessment AND "small and medium enterprises"</i>	167	14	5	186
<i>smart manufacturing AND maturity model AND "small and medium enterprises"</i>	38	4	4	46
<i>fourth industrial revolution AND maturity model AND sme</i>	32	3	3	38
<i>fourth industrial revolution AND assessment AND sme</i>	32	3	3	38
<i>fourth industrial revolution AND assessment AND "small and medium enterprises"</i>	127	11	4	142
<i>fourth industrial revolution AND maturity model AND "small and medium enterprises"</i>	179	16	6	201
Total	1.787	141	50	1.978

O processo adotado consistiu em utilizar os filtros das bases para contemplar na busca o título, o resumo e as palavras-chave e sem delimitação temporal. Com base nesse processo, foram obtidos 1.978 artigos, os mesmos foram importados para o *software* Excel para processamento posterior. Foram aplicados os seguintes critérios para a análise:

- Eliminar artigos em duplicidade;
- Eliminar capítulos de livros;
- Eliminar artigos fora do tema estudado.

Foram descartados 812 artigos duplicados e capítulos de livros, restando 1.166 artigos para serem analisados. Destes 1.166 artigos, foi aplicado como filtro a palavra “*maturity model*” no título e resumo. Após este processo, restaram 173 artigos que formaram a base de dados filtrada da pesquisa. Destes 173 artigos, foi realizada a leitura de títulos e resumos, tendo como objetivo descartar os artigos que não se alinhavam com o tema e, após a leitura chegou-se a 91 artigos alinhados com o tema os quais foi feita a leitura completa dos mesmos, desta forma, obteve-se um portfólio final de 10 artigos. A Tabela abaixo resume os resultados obtidos nessa fase.

Etapas	Retorno	%
Total de artigos brutos obtidos nas bases	1978	100%
Total após exclusão de artigos duplicados e capítulos de livros	1166	58,95%
Total após filtrar pela palavra “ <i>maturity model</i> ” no título e resumo	173	8,75%
Total após filtrar pela leitura do título e resumo	91	4,60%
Total após filtrar pela leitura completa do artigo	14	0,50%

Com base na leitura dos 91 artigos, foram selecionados apenas aqueles que, com base nos objetivos, apresentaram modelos de maturidade que pudessem ser avaliados de acordo com o proposto. Vale ressaltar que a grande maioria dos artigos, apesar de estarem alinhados com o tema de pesquisa, não apresentava nenhum modelo de maturidade, ou seja, não foram incluídos no portfólio final por não atender ao requisito básico de nossa pesquisa. Os modelos de maturidade foram analisados na seção 2.4.

APÊNDICE B - Modelos de Maturidade analisados

Autores	Dimensões	Níveis de maturidade	Método de Avaliação	Aplicado	Perspectiva PME	Limitações
Wagire <i>et al.</i> (2020)	'Pessoas e Cultura', 'Conscientização da Indústria 4.0', 'Estratégia Organizacional', 'Cadeia de Valor e Processos', 'Tecnologia de Manufatura Inteligente', 'Tecnologia Orientada a Produtos e Serviços' e 'Tecnologia de Base da Indústria 4.0'	1 - Outsider / 2 - Iniciante Digital / 3 - Experiente / 4 - Especialista	Apresenta os critérios do modelo com os pesos de cada definidos por especialistas com o uso de FAHP Itens de avaliação: 38	Sim, e questionário disponível	Não apresenta	- Opinião dos especialistas com certo nível de subjetividade; - Aplicação do modelo em diferentes organizações e setores industriais; - inclusão de critérios legais e regulatórios no modelo.
Santos <i>et al.</i> (2019)	Estratégia, estrutura e cultura organizacional, Força de trabalho, Fábricas inteligentes, Processos inteligentes e Produtos e serviços inteligentes.	Nível 0 - baixo ou nenhum grau de implementação. / Nível 1 - ações piloto em planejamento ou em desenvolvimento. / Nível 2 - implementação das ações iniciadas, com alguns benefícios sendo observados. / Nível 3 - implementação parcial de ações, que aumentem a competitividade da empresa. / Nível 4 - implementação avançada de ações, com retorno econômico claro. / Nível 5 - referência na aplicação dos conceitos e	Apresenta os subcomponentes do modelo. Utiliza questionário com escala likert de 5 pontos. Itens de avaliação: 41	Sim, e questionário disponível	Não apresenta	- pequeno número de profissionais que participaram da validação do modelo.

		implementação das tecnologias de Indústria 4.0.				
Collia <i>et al.</i> (2019)	Governança, Tecnologia, Conectividade, Criação de valor, Competências.	Nenhum, Básico, Transparente, Informado, Autônomo, Integrado.	Baseado no PBL, apresenta cinco etapas. Itens de avaliação: não apresenta	Sim, e questionário não disponível	Não apresenta	Ferramenta apresentada precisa ser refinada e tornada mais robusta; - grande necessidade de recursos, limitando a aplicação em pmes; necessidade de construção de uma ferramenta prescritiva de melhoria dentro do contexto.
Bibby e Benjamin (2018)	Fábrica do Futuro, Pessoas e Cultura e Estratégia.	'Mínimo', 'Desenvolvimento', 'Definido' e 'Excelência'	Entrevistas semiestruturadas, workshops e questionário com escala Likert de 5 pontos. Itens de avaliação: 23	Sim, e questionário disponível	Não apresenta	- amostra de avaliação externa baixa; - itens de medição poderiam ser desenvolvidos e validados posteriormente; - design da estrutura pode favorecer uma organização mais focada em uma característica tecnológica.
Ganzarain , e Errasti (2016)	Visão, Capacidade e Ação.	Inicial, Gerenciado, Definido, Transformado e Modelo de Negócios Detalhado.	Não apresenta Itens de avaliação: não apresenta	Sim, e questionário não disponível	Não apresenta	Não apresenta
Asdecker e Felch (2018)	Processamento de pedidos, armazenamento e envio	Digitalização básica, digitalização entre departamentos, digitalização horizontal e vertical, digitalização completa e digitalização completa otimizada	É usada a estrutura de Referência de Operações da Cadeia de Suprimentos (SCOR). Itens de avaliação: não apresenta	Sim, e questionário disponível	Não apresenta	- autores argumentam que modelos de maturidade simplificam a realidade e que sua hipótese carece de base empírica; - opiniões e julgamento de especialistas conferem certo grau de subjetividade; - população e processo de avaliação do modelo com viés regional; - apenas um caso de estudo.

Caiado <i>et al.</i> (2020)	Supply Chain Management, Produção e Gerenciamento de Operações & Supply Chain Management, Produção e Gerenciamento de Operações	Não existente, Conceitual, Gerenciado, Avançado e Auto-otimizado.	Modelo com avaliação multi metodológica, com questionário e entrevista. Utiliza Fuzzy e Simulação de Monte Carlo. Itens de avaliação: 15	Sim, e questionário não disponível	Não apresenta	- apenas uma aplicação realizada; - não avaliado a maturidade em diferentes contextos.
Rauch <i>et al.</i> (2020)	Operações, Organização, Sócio Cultural e Tecnologia.	Cinco níveis foram definidos onde cada um dos 42 itens possui sua descrição.	Entrevistas com avaliação em escala Likert de 5 pontos para cada item Itens de avaliação: 42	Sim, e questionário não disponível	Sim	- esforço de avaliação (tempo dispendido para realização);
Lizarralde <i>et al.</i> (2020)	Funcionários, Estratégia e organização, Fábrica Inteligente, Orientação à Dados, Operações Inteligentes e Produtos Inteligentes	Não iniciado; Iniciante; Intermediário; Experiente; Especialista; Melhores desempenhos	Questionário padronizado que consiste numa questão fechada por sub dimensão com avaliação da escala Likert de cinco pontos. Itens de avaliação: 24	Sim, e questionário disponível parcial	Sim	Não apresenta
Pirola <i>et al.</i> (2019)	Estratégia, pessoas, processos, tecnologia e integração	Cinco níveis (DRL 1; DRL 2; DRL 3; DRL 4; DRL 5)	Modelo apresenta 46 questões distribuídas em 3 etapas, sendo elas: estatísticas vitais da empresa, avaliação em escala Likert de cinco pontos e questões relacionadas ao investimento de curto prazo a ser realizado pela companhia. Itens de avaliação: 46	Sim, e questionário disponível	Sim	Não apresenta

**APÊNDICE C – Análise dos Modelos de Maturidade sob a ótica dos critérios de
avaliação**

Artigo	Autores	Modelo de Maturidade	Perspectiva PME	Ferramentas de avaliação disponíveis	Quantidade de níveis de Maturidade	Estrutura das perguntas	Respostas com descrição de cada nível de Maturidade
Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice	Wagire <i>et al.</i>	M1	NM	MP	MC	M	MC
An Industry 4.0 maturity model proposal	Santos e Martinho	M2	NM	MC	MP	MC	MC
A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era	Colli <i>et al.</i>	M3	NM	NM	M	NM	NM
Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defense sector	Bibby e Dehe	M4	NM	MC	NM	MC	MC
Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0	Ganzarain e Errasti	M5	NM	NM	NM	NM	NM
Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains	Asdecker e Felch	M6	NM	MP	NM	M	MC
A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management	Caiado <i>et al.</i>	M7	NM	NM	NM	NM	NM
A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises	Rauch <i>et al.</i>	M8	MC	NM	MS	NM	NM
An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies	Rafael <i>et al.</i>	M9	MC	MP	MP	M	MC
Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research	Pirola, Cimini e Pinto	M10	MC	MC	M	MC	MC

APÊNDICE D – Modelo de Maturidade utilizado para avaliação

O modelo final do DRL 4.0 compreende 45 questões. Para facilitar os respondentes, o questionário foi aplicado em italiano, com o modelo estruturado em três seções principais. Na primeira seção, 12 questões fechadas relativas às estatísticas vitais da empresa visam identificar a dimensão da empresa em termos de emprego e volume de negócios, a indústria e as características gerais do processo de produção. A segunda seção inclui 24 questões em escala *Likert* de cinco pontos sobre a implementação tecnológica da Indústria 4.0 dentro da empresa, abrangendo cinco dimensões diferentes. Essas perguntas são a principal contribuição para a avaliação do DRL. A seção final inclui dez questões de escolha única sobre os investimentos que a empresa examinada está realizando ou pretende avaliar no curto prazo. Essas perguntas podem influenciar a pontuação final. De fato, se uma empresa está realizando um investimento em uma tecnologia, um incremento é atribuído à pontuação da implementação atual dessa tecnologia.

Considerando as questões da segunda seção do DRL 4.0, referentes a tecnologias e funcionalidades, os respondentes deveriam responder $a_j \in \{1, \dots, 5\}$ (escala *Likert* de cinco pontos) cada uma delas, com pontuação $S_i \in [1, 5]$ definido para cada dimensão i da seguinte forma:

$$S_i = \frac{\sum_{j \in Q_i} b_j}{m_i}$$

Onde Q_i é o subconjunto de questões referentes à dimensão i , e b_j é um parâmetro calculado da seguinte forma:

- $b_j = 0$ se a tecnologia/recurso j for considerada não aplicável;
- $b_j = a_j$ se a tecnologia/recurso for aplicável e a empresa não estiver planejando investir nele (ou o investimento já foi realizado e concluído); e
- $b_j = \min(a_j + 1; 5)$ se a tecnologia/recurso for aplicável e a empresa estiver atualmente investindo nele.

e m_i é definido como:

$$m_i = \text{card}(\{j : j \in Q_i \wedge b_j > 0\})$$

A partir dessas pontuações, um único índice I é calculado:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}$$

onde $n = 5$ é o número total de dimensões.

A nota final I define o DRL da empresa.

1. Nome da empresa

2. A empresa pertence a um grupo?

3. Em qual setor industrial sua empresa atua?
 - Fabricação de madeira
 - Produção de móveis
 - Agricultura
 - Produção de alimentos e bebidas
 - Indústria têxtil
 - Produção de máquinas
 - Produção de produtos metálicos
 - Produção de produtos químicos
 - Produção de borracha e material plástico
 - Outro

4. Qual é a abordagem de sua empresa em relação aos pedidos dos clientes?
 - Engenharia por encomenda
 - Faça sob encomenda
 - Fazer para estoque

5. Quantos funcionários há em sua empresa?
 - Menos de 10
 - De 10 a 49
 - De 50 a 249
 - Mais de 250

6. Qual é o faturamento médio anual da sua empresa?
 - Menos de 1 milhão
 - De 1 a 10 milhões

- De 10 a 50 milhões
- Mais de 50 milhões

7. Quanto do faturamento anual é investido em P&D?

- Menos de 1%
- 1-5%
- 5-10%
- Mais de 10%

8. A empresa possui alguma patente?

9. Como está alocado o mercado da sua empresa (%)?

- Nacional
- Europa
- Extra Europa

10. Como é o processo de fabricação da sua empresa?

- Processo de fabricação de fabricação
- Linhas de montagem manuais
- Linha de montagem/produção automatizada
- Produção de loja de trabalho
- Outro

11. A empresa terceiriza alguma atividade?

- Nenhuma atividade terceirizada
- Produtos semiacabados
- Atividades mecânicas
- Tratamentos de superfície
- Gerenciamento de armazenagem
- TI
- Outro:

12. Qual é o nível de digitalização de sua planta de produção?

- Sistema de produção puramente físico
- Sistema de produção pouco digitalizado
- Médio sistema de produção digitalizado
- Sistema de produção bem digitalizado
- Sistema de produção totalmente digitalizado

13. Selecione o nível de competência dos funcionários da sua empresa nas áreas-chave da indústria 4.0 (onde 1 significa "sem competências" e 5 "competências excelentes")

- Infraestruturas de TI
- Análise/análise de dados
- Segurança de dados/segurança cibernética
- IoT e CPS
- Automação
- Robótica
- Manufatura Aditiva
- Tecnologias de nuvem e Big Data
- Simulação de produto
- Simulação de Processo
- Outro

14. Há uma estratégia de indústria 4.0 definida em sua empresa para os próximos 5 anos? Em caso afirmativo, que ferramentas/análises de apoio são utilizadas?

- Uma estratégia não foi definida
- Uma estratégia não foi definida, mas gostaríamos de defini-la
- A estratégia está em definição
- Uma estratégia foi definida, mas não como plano de ação
- Ferramenta de suporte/análise

15. Existe um roteiro para planejar as atividades de introdução de soluções da indústria 4.0 em sua empresa?

- Um roteiro não existe
- Um roteiro não existe, mas vamos defini-lo
- Um roteiro está em definição
- Existe um roteiro e estamos começando com a fase de implementação
- Existe um roteiro e está totalmente implementado

16. Quais são as principais barreiras para implementar uma estratégia de indústria 4.0 em sua empresa?

- Falta de uma visão clara/estratégia digital
- Falta de conhecimento sobre provedores de serviços e tecnologias
- Falta de pessoal com habilidades adequadas
- Falta de um plano de ação
- Dificuldades em ativar colaborações externas em tecnologias digitais
- Obstáculos de colaboração interna entre as unidades organizacionais
- Falta de automação, infraestrutura de TI e tecnologias dentro da empresa
- Custos e problemas associados à implementação de soluções da indústria 4.0
- Benefícios pouco claros dos investimentos digitais
- Problemas relacionados à segurança de dados, privacidade e responsabilidade
- Falta de conhecimento do hardware necessário
- Falta de solução adequada para PMEs - as soluções propostas geralmente não são acessíveis

17. Em quais unidades operacionais sua empresa está planejando investimentos/desenvolvendo projetos de digitalização? Indique o objeto do investimento.

	Nenhum investimento planejado	Os investimentos estão em discussão	Investimentos planejados, mas não em execução	Investimento em andamento	Investimentos concluídos
Vendas e Marketing					
Engenharia, P&D					
Compras					
Produção					

Gestão de qualidade					
Manutenção Interna					
Logística					
Pós vendas/ serviço					
RH					
Cíber segurança					
Infraestrutura de TI					
Outro:					

18. Qual é o nível de envolvimento, apoio e experiência da liderança/gestão de topo da sua empresa em relação à Indústria 4.0

- Baixo envolvimento da liderança
- Envolvimento parcial
- Envolvimento moderado
- Bom envolvimento
- Alto envolvimento

19. Sua empresa coleta dados do sistema produtivo?

- Não, não coletamos dados do sistema de produção e não sabemos quais dados coletar
- Não, não coletamos dados do sistema de produção, mas sabemos quais dados coletar
- Sim, mas não de forma contínua (por exemplo, apenas no final do turno)
- Sim, em dados contínuos e específicos (tempo real)
- Sim, de forma contínua e os dados podem ser visualizados remotamente (tempo real)

20. Quais dados sobre máquinas/processos são coletados? Como eles são coletados?

	Não aplicável	Não, eles não são coletados	Sim, com suporte de papel	Sim, não de forma contínua e o sistema de coleta de dados não está conectado ao sistema de informações da empresa	Sim, de forma contínua, mas o sistema de coleta de dados não está conectado ao sistema de informações da empresa	Sim, e o sistema de coleta de dados está conectado ao sistema de informações da empresa
Dados do armazém						
Desempenho em máquinas de montagem em linha						
Tempo de fluxo/tempo de transformação						
Disponibilidade de máquinas de produção Desperdícios/defeitos de produção						
Falhas/mau funcionamento de máquinas						
Causas de falhas / mau funcionamento de máquinas / montagem						
Parâmetros de processo (temperatura, vibrações etc.)						
Desempenho de pessoal						
Consumo de energia						
Outro						

21. Para que foram usados os dados coletados?

- Manutenção baseada em condições/manutenção preditiva de máquinas de produção
- Otimização do consumo de recursos (materiais, energia, pessoal)
- Criação de dashboard de indicadores de desempenho para acompanhamento do processo produtivo
- Gestão da Qualidade
- Controle de produção automatizado através do uso de dados em tempo real
- Otimização da gestão de pessoas
- Outro

22. Qual é o plano de investimento da sua empresa na coleta de dados de máquinas e processos?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com uma estratégia
- Investimento concluído

23. Sua empresa coleta dados comerciais? Se sim, usando qual ferramenta?

- Os dados comerciais não são coletados
- Os dados de negócios são coletados, mas não analisados
- Os dados de negócios são coletados e analisados ocasionalmente, para avaliar os processos de negócios
- Os dados de negócios são coletados e analisados periodicamente, para avaliar os processos de negócios
- Os dados de negócios são coletados e analisados periodicamente, para avaliar os processos de negócios. A informação tem um valor de indústria 4.0 para avaliar a experiência do cliente

Ferramenta de coleta de dados:

- Ferramenta de gerenciamento
- CRM
- Rede
- Mídia social

24. Os dados de negócios coletados são analisados e usados para apoiar as decisões?

- Não, atualmente os dados não são analisados e não sabemos como fazê-lo
- Não, atualmente os dados não são analisados, mas vamos fazê-lo
- Sim, os dados são analisados por sistemas autônomos (por exemplo, Excel etc.)

- Sim, alguns dos dados coletados são analisados (analytics) e utilizados para suporte à decisão (produto/serviço/melhoria) e definição de atividades de melhoria contínua.

25. Qual é o plano de investimento da sua empresa para analisar os dados coletados e utilizar as informações coletadas?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com uma estratégia
- Investimento concluído

26. Quais sistemas de TI são utilizados em sua empresa e quais são integrados ao sistema de informação principal?

	Sistema de Informação Principal	Não usado	Usado. Mas não integrado	Usado e integrado	Introdução em avaliação	Substituição em avaliação
Sistema de Recursos Empresariais (ERP)						
Sistema de Execução de Fabricação (MES)						
Gerenciamento do Ciclo de Vida da Produção (PLM)						
Gestão de Relacionamento com o Cliente (CRM)						
Desenho assistido por computador (CAD)						
Manufatura Assistida por Computador (CAM)						
Gerenciamento de documento						
Gestão de fluxo de trabalho						
Comércio eletrônico						
Sistema de Gerenciamento de Armazém (WMS)						
Outro:						

27. Como sua empresa gerencia o know-how?

- Não gerenciado
- Através da experiência dos trabalhadores
- Usando um método de codificação e classificação de conhecimento
- Através de aplicações individuais para know-how específico

- Utilizando um aplicativo integrado ao sistema de informação principal

28. Qual é o seu plano de investimento empresarial em gestão do conhecimento?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com estratégia
- Investimento concluído

29. A robótica é usada para apoiar os trabalhadores? Em caso afirmativo, que tipo de sistemas robóticos são usados?

- Sem sistema de robótica
- Sistemas robóticos tradicionais
- Veículos guiados automaticamente (AGV)
- Robótica colaborativa
- Outro especificar:

30. Qual é o plano de investimento da sua empresa para a introdução de sistemas robóticos?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com estratégia
- Investimento concluído

31. A Indústria 4.0 e a digitalização de produtos oferecem a possibilidade de produzir através de processos de produção aditiva (e.d. impressão 3D). Sua empresa tem esse rei da tecnologia?

- Não, não usamos produção aditiva/impressão 3D
- Sim, raramente usamos produção aditiva/impressão 3D para amostras/protótipos
- Sim, usamos constantemente produção aditiva/impressão 3D para amostras/protótipos
- Sim, usamos constantemente produção aditiva/impressão 3D nos processos de produção

32. Qual é o plano de investimento da sua empresa para produção aditiva?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com estratégia
- Investimento concluído

33. Qual o grau de integração (do ponto de vista da TI) com clientes e fornecedores?

	Todos os clientes	Principais clientes	Todos os fornecedores	Principais fornecedores
Sem integração				
Área privada no portal corporativo para atendimento personalizado				
EDI (Electronic Data Interchange) - o intercâmbio de dados entre sistemas de informação, através de um canal dedicado e em formato específico				
Sistemas de informação totalmente integrados				
Outro:				

34. Serviços de conectividade e sistemas em nuvem podem apoiar a empresa no gerenciamento e processamento de dados do campo. Quais serviços de computação em nuvem são usados na empresa?

	Não usado	Sabe, mas não usa	Usado
Dados como serviço: espaço de armazenamento			

Software como serviço: uso de programas instalados em um servidor remoto muitas vezes por meio de um servidor web			
Hardware como serviço: envio de dados que são processados e devolvidos			

35. Qual é o plano de investimento da sua empresa para serviços em nuvem?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com estratégia
- Investimento concluído

36. Que tipo de sistema de interface homem-máquina sua empresa utiliza para receber e editar informações?

	Não usado	Usado para receber informações	Usado para modificar informações	Usado para receber e modificar informações	Introdução em avaliação
Sistemas de interface tradicionais					
Tábua					
Relógio inteligente					
Realidade virtual					
Realidade aumentada					
Outro:					

37. Qual é o plano de investimento de sua empresa em sistemas de interface homem-máquina?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde

- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com estratégia
- Investimento concluído

38. Qual é a estrutura organizacional do departamento de TI da sua empresa

- Departamento de TI ausente
- TI terceirizada
- TI centralizada
- TI descentralizada
- Especialistas em TI em cada área de negócio

39. Quais são os sistemas de identificação de produtos utilizados em sua empresa?

	Peça única/bom	Lote	Produto semiacabado	Produto final
Nenhum				
Código de barras 1D				
Código de barras 2d				
RFID				
Outro:				

40. Qual é o plano de investimento da sua empresa em sistemas de identificação de produtos?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com estratégia
- Investimento concluído

41. A coleta de dados e os produtos conectados abrem novas oportunidades de negócios, como contratos de manutenção baseados em condições ou serviços pay-per-use. Sua empresa oferece esse tipo de serviço?

- Não aplicável
- Não, os serviços pós-venda não são oferecidos pela empresa
- Sim, mas sem a conexão com os produtos do cliente
- Sim, com produtos de clientes conectados

42. Quais serviços pós-venda orientados a dados são oferecidos por sua empresa?

	Não aplicável	Não oferecido	Oferecido	Introdução em avaliação
Manutenção preditiva/baseada em condições				
Monitoramento remoto de produtos				
Assistência remota				
Serviços de pagamento por uso				
Par por serviços de desempenho				

43. Qual é o plano de investimento da sua empresa em relação à oferta de serviços orientados a dados?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com estratégia
- Investimento concluído

44. A empresa utiliza as redes sociais por meio de um perfil comercial?

- Não
- Facebook
- LinkedIn
- Twitter
- Instagram
- YouTube

- Outro:

45. Qual é o seu plano de investimento empresarial para o uso das redes sociais?

- Não aplicável
- Conhecemos a vantagem, mas você não planeja investir
- Gostaríamos de investir, mas não sabemos como e onde
- Estamos pensando em investir
- Estamos investindo com estratégia
- Investimento concluído