

**UNIVERSIDADE MUNICIPAL DE SÃO CAETANO DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO
DOUTORADO**

Carlos Augusto Nakano

**A relação entre a prontidão tecnológica e a maturidade das
empresas de manufatura no contexto da Indústria 4.0**

**São Caetano do Sul
2024**

CARLOS AUGUSTO NAKANO

**A relação entre a prontidão tecnológica e a maturidade das
empresas de manufatura no contexto da Indústria 4.0**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Municipal de São Caetano do Sul como requisito para a obtenção do título de Doutor em Administração.

Área de Concentração: Gestão e Regionalidade

Orientador: Prof. Dr. Milton Carlos Farina

"O presente trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Municipal de São Caetano do Sul (USCS) com a concessão de bolsa de estudo parcial."

**São Caetano do Sul
2024**

FICHA CATALOGRÁFICA

NAKANO, Carlos Augusto

A relação entre a prontidão tecnológica e a maturidade das empresas de manufatura no contexto da Indústria 4.0 / Carlos Augusto Nakano. – São Caetano do Sul: USCS, 2024.

151 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Milton Carlos Farina

Tese (doutorado) – USCS, Universidade Municipal de São Caetano do Sul, Programa de Pós-Graduação em Administração, 2024.

1. Maturidade Indústria 4.0. 2. Prontidão tecnológica. 3. Indústria 4.0. 4. Redes organizacionais. 5. Cadeia de suprimentos. I. Título. II. Farina, Milton Carlos. III. USCS - Programa de Pós-Graduação em Administração.

Reitor da Universidade Municipal de São Caetano do Sul

Prof. Dr. Leandro Campi Prearo

Pró-reitora de Pós-graduação e Pesquisa

Prof.^a Dra. Maria do Carmo Romeiro

Gestor do Programa de Pós-graduação em Administração

Prof. Dr. Eduardo de Camargo Oliva

Tese de doutorado defendida e aprovada em 29/02/2024 pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Milton Carlos Farina (orientador – Universidade Municipal de São Caetano do Sul)

Prof. Dr. Celso Machado Júnior (Universidade Municipal de São Caetano do Sul)

Profa. Dra. Raquel da Silva Pereira (Universidade Municipal de São Caetano do Sul)

Prof. Dr. Diógenes de Souza Bido (Universidade Presbiteriana Mackenzie)

Prof. Dr. Rodrigo Fernando Gallo (Universidade de São Paulo - USP)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade concedida e por me sustentar com saúde todos esses dias.

Agradeço à minha esposa que de forma incondicional me apoiou em todos os momentos, e, principalmente, nos mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Milton Carlos Farina, um agradecimento especial pela paciência e capacidade de me orientar ao longo desses anos.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-graduação da Universidade Municipal de São Caetano do Sul e a todos os funcionários que contribuíram para viabilizar a realização da pesquisa de Doutorado.

Aos professores membros da banca, pela participação com valiosas e imprescindíveis contribuições para a finalização deste trabalho.

Agradeço a Universidade Municipal de São Caetano do Sul pela concessão de bolsa de estudo parcial, que viabilizou a realização deste projeto.

Ao Instituto Mauá de Tecnologia, que me permitiu levantar dados de empresas em eventos realizados em suas dependências. E, por fim, agradeço aos colegas de trabalho, pelo incentivo e também pelas contribuições, que me ajudaram a atingir esse objetivo. Muito obrigado.

NAKANO, Carlos Augusto. **A relação entre a prontidão tecnológica e a maturidade das empresas de manufatura no contexto da Indústria 4.0.** Universidade Municipal de São Caetano do Sul. São Caetano do Sul, SP, 2024.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo avaliar a relação entre a prontidão tecnológica e a maturidade das empresas de manufatura no contexto da Indústria 4.0, chamada de 4ª Revolução Industrial. Esse novo contexto permite a possibilidade de obter melhores resultados em produtividade e flexibilidade, intensifica mudanças nas empresas e no desenvolvimento econômico local ou nacional; com isso, estimula pesquisas acadêmicas, como a proposta de novos modelos que sejam capazes de avaliar a prontidão tecnológica e o nível de maturidade dessas empresas. Esta pesquisa primeiramente validou, com especialistas, um modelo de prontidão tecnológica e maturidade das empresas para a Indústria 4.0, desenvolvido para a verificação do estado dessas organizações que participam da rede da cadeia de suprimentos. Em seguida, para coletar as informações, foi aplicado esse modelo com gestores, administradores e profissionais de TI dessas empresas e, na sequência, realizadas análises, com auxílio do SmartPLS 4, nas quais verificou-se que a maturidade das organizações teve uma variância explicada superior a 64% e influência na prontidão tecnológica para a implantação da Indústria 4.0 e concluiu-se que o modelo foi adequado, confirmando a hipótese proposta. A pesquisa buscou também fornecer e contribuir no desenvolvimento de uma ferramenta, para estudos futuros, para possibilitar às empresas uma atualização aos novos desafios por meio da análise da prontidão tecnológica e do nível de maturidade para a implantação da Indústria 4.0.

Palavras-chave: maturidade indústria 4.0; prontidão tecnológica; indústria 4.0; modelo de maturidade e prontidão tecnológica; redes organizacionais; cadeia de suprimentos.

NAKANO, Carlos Augusto. **The relationship between technological readiness and the maturity of manufacturing companies in the context of Industry 4.0.** Municipal University of São Caetano do Sul. São Caetano do Sul, SP, 2024.

ABSTRACT

The aim of this study was to assess the relationship between technological readiness and the maturity of manufacturing companies in the context of Industry 4.0, known as the 4th Industrial Revolution. This new context allows for the possibility of obtaining better results in terms of productivity and flexibility, intensifies changes in companies and in local or national economic development; with this, it stimulates academic research, such as the proposal of new models that are capable of assessing the technological readiness and maturity level of these companies. This research first validated, with experts, a model of technological readiness and maturity of companies for Industry 4.0, developed to verify the state of these organizations participating in the supply chain network. Next, to collect the information, this model was applied to managers, administrators and IT professionals from these companies, and analyses were then carried out using SmartPLS 4, in which it was found that the maturity of the organizations had an explained variance of more than 64% and influences technological readiness for the implementation of Industry 4.0 and it was concluded that the model was adequate, confirming the proposed hypothesis. The research also sought to provide and contribute to the development of a tool, for future studies, to enable companies to keep up to date with new challenges by analyzing technological readiness and the level of maturity for implementing Industry 4.0.

Keywords: maturity industry 4.0; technological readiness; industry 4.0; maturity and technological readiness model; organizational networks; supply chain.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	<i>Additive Manufacturing</i> (Manufatura Aditiva)
AMR	<i>Autonomous Mobile Robots</i> (Robôs Móveis Autônomos)
AR	<i>Augmented Reality</i> (Realidade Aumentada)
BI	<i>Business Intelligence</i> (Inteligência de Negócios)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Design Auxiliado por Computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Auxiliada por Computador)
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i> (Manufatura Integrada por Computador)
CMMI	<i>Capability Maturity Model Integration</i> (Integração do Modelo de Maturidade de Capacidade)
CPS	<i>Cyber Physical Systems</i> (Sistemas Ciber Físicos)
DM	<i>Digital Manufacturing</i> (Manufatura Digital)
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> (Planejamento de Recursos Empresariais)
FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i> (Sistema de Manufatura Flexível)
GALP	<i>Green and Lean Production</i> (Produção Verde e Enxuta)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
HTI	<i>Higher Technological Intensity</i> (Maior Intensidade Tecnológica)
IA	Inteligência Artificial
IMBEL	Indústria de Material Bélico
INSENT	<i>Innovative Smart Enterprise</i> (Empresa Inteligente Inovadora)
IoE	Industrialização Orientada para Exportação
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IoTS	<i>Internet of Things and Services</i> (Internet das Coisas e Serviços)
IPMA	<i>International Project Management Association</i> (Associação Internacional de Gerenciamento de Projetos)
KMO	<i>Kaiser - Meyer – Olkin</i>
LTI	<i>Lower Technological Intensity</i> (Menor Intensidade Tecnológica)
M2M	<i>Machine To Machine</i> (Máquina a Máquina)
MÊS	<i>Manufacturing Execution Systems</i> (Sistemas de Execução de Manufatura)

OSCM	<i>Operations and Supply Chain Management</i> (Operações e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos)
PIB	Produto Interno Bruto
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i> (Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto)
PME's	Pequenas e Médias Empresas
POM	<i>Production and Operation Management</i> (Gerenciamento de Produção e Operação)
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis</i> (Itens de Relatório Preferidos para Revisões Sistemáticas e Meta-Análise)
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> (Identificação por Radiofrequência)
SEI	<i>Software Engineering Institute</i> (Instituto de Engenharia de Software)
S3RM	<i>Smart and Sustainable Supply chain Readiness and Maturity model</i> (Modelo de prontidão e maturidade da cadeia de suprimentos inteligente e sustentável)
SCM	<i>Supply Chain Management</i> (Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos)
TI	Tecnologia da Informação
TIC	Tecnologia da informação e comunicação
TPS	<i>Toyota Production System</i> (Sistema Toyota de Produção)
VL	Variável Latente
VM	<i>Virtual Machine</i> (Máquina Virtual)
VMT	<i>Virtual Machine Tool</i> (Ferramenta de Máquina Virtual)
VPI4	<i>Index of Industry 4.0</i> (Índice Indústria 4.0)
VR	<i>Virtual Reality</i> (Realidade Virtual)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tecnologias mais citadas.....	50
Figura 2 - Etapas da metodologia	60
Figura 3 - Modelo de Equação Estrutural.....	82
Figura 4 - Indústria 4.0 (Dimensões e <i>Drivers</i> de Valor)	85
Figura 5 - Modelo conceitual influencia o gerenciamento de projetos com I4.0	86
Figura 6 - Estrutura Conceitual do Estudo	88
Figura 7 - <i>Construction of Research</i>	96
Figura 8 - Modelo Conceitual	100
Figura 9 - Modelo de equação estrutural formativo	118
Figura 10 - Modelo estrutural formativo.....	120
Figura 11 - Modelo estrutural reflexivo	121
Figura 12 - Variáveis latentes conectadas entre si.....	124
Figura 13 - Cálculos da AVE e CR para VL de segunda ordem.....	131
Figura 14 - Cargas do Modelo Reflexivo	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Modelo de maturidade da Indústria 4.0 para operações e SCM	61
Quadro 2 - Estratégia e Organização – Níveis, perfis e características	69
Quadro 3 - Fábrica Inteligente – Níveis, perfis e características	70
Quadro 4 - Operações Inteligentes – Níveis, perfis e características.....	71
Quadro 5 - Produtos Inteligentes – Níveis, perfis e características	72
Quadro 6 - Serviços Orientados por Dados – Níveis, perfis e características	73
Quadro 7 - Funcionários – Níveis, perfis e características	74
Quadro 8 - Níveis de categorização de implantação da Indústria 4.0	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relevância da Indústria 4.0 nas organizações	54
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de correlações entre as variáveis latentes de primeira ordem.....	125
Tabela 2 - Matriz de cargas fatoriais	126
Tabela 3 - Matriz de correlações entre as VL formativo	128
Tabela 4 - Matriz de cargas fatoriais do modelo estrutural.....	129
Tabela 5 - Resultados do modelo estrutural formativo	130
Tabela 6 - Matriz de correlações entre as VL reflexivo	132
Tabela 7 - Resultados do modelo estrutural reflexivo	133

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema da pesquisa	19
1.2	Objetivos da pesquisa	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos da pesquisa	20
1.3	Justificativa e relevância da pesquisa.....	20
1.4	Delimitação do estudo	21
1.5	Organização do estudo.....	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1	Indústria 4.0.....	25
2.1.1	Principais tecnologias e componentes relevantes da Indústria 4.0	35
2.1.2	Indústria 4.0 nas empresas	50
2.2	Modelos de maturidade e prontidão tecnológica para a Indústria 4.0	55
2.2.1	Industry 4.0 maturity and readiness models: a systematic literature review and future framework.....	56
2.2.2	A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management.....	58
2.2.3	Readiness of enterprises in Czech Republic to implement Industry 4.0: Index of Industry 4.0.....	62
2.2.4	Avaliação do nível de maturidade da Indústria 4.0: o caso de uma empresa estratégica de defesa	68
2.2.5	A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises	76
2.2.6	Analysis of the current state of Croatian manufacturing industry with regard to Industry 4.0.....	78
2.2.7	Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization roadmap	79
2.2.8	Factors affecting adoption of Industry 4.0 by small- and medium-sized enterprises: a case in Ho Chi Minh City, Vietnam.....	81
2.2.9	Development of professional competencies for Industry 4.0 project management.....	83
2.2.10	Impact of management practices on organisational innovation in the digital age: a study of the manufacturing industry in Malaysia	87

2.2.11	Readiness and maturity of smart and sustainable supply chains: a model proposal.....	89
2.2.12	Industry 4.0 and business policy development: strategic imperatives for SME performance	91
2.2.13	Development of a digitalization maturity model for the manufacturing sector .	92
2.2.14	Readiness to face Industry 4.0	93
2.2.15	Industry 4.0 maturity models: review and classification as a support for Industry 4.0 implementation	97
2.2.16	Intelligent transformation of the manufacturing industry for Industry 4.0: seizing financial benefits from supply chain relationship capital through enterprise green management (2021)	99
2.3	Maturidade e prontidão tecnológica: uma análise dos artigos apresentados	100
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	107
3.1	Dimensões e indicadores do modelo de maturidade das empresas para implantação da Indústria 4.0.....	108
3.1.1	Estratégia e Organização (EO).....	110
3.1.2	Qualificação dos Funcionários (QF)	112
3.1.3	Manufatura e Processos Inteligentes (MPI).....	113
3.1.4	Tecnologia da Informação (TI).....	114
3.1.5	Serviços orientados por dados (SOD)	115
3.1.6	Produtos Inteligentes (PI)	115
3.2	Modelo de equação estrutural	117
3.2.1	Modelo estrutural com variável latente de segunda ordem formativo (repetindo indicadores)	119
3.2.2	Modelo estrutural com variável latente de segunda ordem reflexivo (repetindo indicadores)	120
3.3	Amostra e Coleta de dados	121
4	ANÁLISE DOS DADOS	124
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	134
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
	REFERÊNCIAS.....	138
	APÊNDICE A – INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS.....	146

1 INTRODUÇÃO

Em um mercado cada vez mais competitivo, as fábricas industriais são pressionadas a buscar alternativas para qualificar seus produtos e serviços além de, continuamente, visar a redução de seus custos. Segundo Souza (2000), as organizações reconhecem essa exigência e buscam soluções para melhor coordenar as suas atividades das cadeias de valores, a fim de evitar desperdícios de recursos, dessa forma, diminuindo os custos e o tempo de resposta às mudanças das necessidades do mercado. Tem-se a exigência de aperfeiçoar os processos e dotar os funcionários com novas habilidades e competências às novas maneiras de produção.

Os aspectos de crise causados por conta da proliferação do vírus do Covid-19, geraram uma grande mudança em toda a rede da cadeia de suprimentos. Antes desse período de pandemia, com um cenário econômico mais estável e uma demanda pela prestação de serviços aumentando, as empresas se encontravam em um momento evolutivo de suas cadeias de suprimentos e logística. Com a disseminação da pandemia em 2020, as empresas tiveram que se reorganizar para atender as novas exigências dos clientes. Fizeram mudanças e sacrifícios, em sua rede da cadeia de suprimentos, para reajustar e antecipar a possíveis problemas (Araujo; Ramos, 2023).

Para Santos *et al.* (2018), o desenvolvimento da Tecnologia da Informação (TI) com a integração dos sistemas e processos de produção trouxeram melhoras para a cadeia de valor. Com a evolução das tecnologias, a capacidade produtiva industrial tem aumentado, buscando reduzir custos e fornecendo soluções melhores a cada dia, para atender os clientes com velocidade, melhor qualidade, e uma relação de custo/benefício mais adequada, sobretudo com a utilização de muita tecnologia.

Segundo Urbikain *et al.* (2017), as empresas mais bem-sucedidas começaram a implementar novas estratégias simultâneas e multidisciplinares fortemente ligadas aos requisitos do cliente. Então, a manufatura de arquitetura aberta e a manufatura ágil apareceram como tendências emergentes na automação para a Indústria 4.0.

Até o início da década de 1990, os sistemas permitiam que os desenvolvedores criassem controles exclusivos para serem envolvidos na arquitetura desses sistemas,

dificultando a cópia pelos concorrentes. Esse método de proteção funcionou durante alguns anos, quando o controle do desenvolvimento durou pelo menos 4 ou 5 anos. Agora que o ciclo de vida é mais curto, para manter-se competitivo em termos de custo e tecnologia, os sistemas requerem mais tempo para incorporar novas tecnologias em seus programas do que o próprio ciclo de vida dessa tecnologia (Urbikain *et al.*, 2017).

Um novo modelo para a indústria está sendo discutido em todo o mundo sob o tema Indústria 4.0, com o objetivo de atender um momento de desenvolvimento tecnológico global e da necessidade de produtos e serviços cada vez mais personalizados, com maior qualidade e custos reduzidos (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

Considerada como a Quarta Revolução Industrial, a Indústria 4.0 é o termo empregado para descrever a estratégia de inovação com a utilização de alta tecnologia, que está sendo adotada pelas organizações. Com uma enorme gama de recursos avançados conectados à Internet, visa melhorar a eficácia e a flexibilidade dos sistemas produtivos, tornando-os mais colaborativos.

A Indústria 4.0 é a transformação de processos com desenvolvimento de TI, a utilização de dispositivos móveis, software de automação e robótica, além de sensores inteligentes para coletar conjuntos de dados de grandes tamanhos, armazenar, analisar e usá-los com simulação, realidade virtual e gêmeos digitais (Vrchota; Pech, 2019). Os gêmeos digitais são simulações virtuais de produtos e serviços, geradas com a integração de sensores em um item físico. Os sensores conectados coletam as movimentações e respostas desse item e as projetam em um ambiente virtual, criando uma cópia exata. A partir de então, essa cópia inicia a operação dentro de um mundo simulado, alimentado por inúmeros dados e algoritmos que possuem a capacidade de apresentar resultados de maior probabilidade da execução do item conectado.

A fabricação que utiliza a Internet melhora a comunicação entre fornecedores, fabricantes e clientes, e com isso reduz o tempo de colocação do produto / serviço no mercado. A Quarta Revolução Industrial é um conceito com tecnologia de ponta, que foi promovida pelo governo alemão, com a adoção de novas tecnologias pelas indústrias tradicionais de manufatura (Santos *et al.*, 2018).

A busca é por uma fábrica inteligente (*Smart Factory*), que seja capaz de se adaptar constantemente às novas necessidades de uma forma rápida, com a

utilização cada vez mais eficiente de recursos, além de uma melhor integração com clientes e outros parceiros nos processos de negócios e de valor.

Schwab (2016) descreve fábrica inteligente como uma instalação de produção altamente digitalizada e conectada, capaz de coletar e analisar dados de várias fontes, como máquinas e sensores, em tempo real. Isso possibilita a otimização dos processos de produção, o aumento da eficiência e um atendimento rápido às mudanças das demandas do mercado. Além disso, as fábricas inteligentes são frequentemente caracterizadas pelo uso de tecnologias avançadas, como robótica, inteligência artificial e a Internet das Coisas ou *Internet of Things* (IoT) para automatizar e simplificar a produção.

A base tecnológica são os Sistemas Ciber Físicos ou *Cyber Physical Systems* (CPS) e a IoT, da qual espera-se que as futuras redes sem fio do chão de fábrica controlem de forma remota manipuladores e robôs, bem como máquinas com Controle Numérico de Computador (Urbikain *et al.*, 2017).

É importante buscar compreender o significado geral da Indústria 4.0, e ainda apresentar seus desafios e benefícios para sua implantação. Ao aplicar essa forma de produzir, uma conexão entre humanos, objetos e sistemas formará novas redes dinâmicas, otimizadas em tempo real e auto-organizadas, com criação de valor entre empresas que impactarão todos os processos das organizações.

Para tanto, será necessário suportar maiores volumes de dados e disponibilidade em tempo real, o que irá requerer uma nova infraestrutura também. A flexibilidade, padrões de qualidade, eficiência, entre outros, são alguns dos benefícios que poderão ser identificados com a implantação da Indústria 4.0. Isso permitirá que as organizações atendam às necessidades dos clientes, e ainda criando outros valores. Muitas empresas ainda resistem em começar seus processos de transformação digital devido às incertezas do retorno com investimentos financeiros em tecnologia e pela falta de um maior conhecimento especializado (Mohamed, 2018).

A Indústria 4.0 e a sustentabilidade são consideradas as principais tendências do atual sistema de produção. Propõe-se que, por sinergia e juntas, devem constituir uma nova era industrial distinta que mudará profundamente os sistemas de produção mundiais. Isso se deve ao enorme potencial que a Quarta Revolução Industrial tem para destravar totalmente a sustentabilidade industrial por meio de suas tecnologias

inteligentes e automatizadas, caminhando em uma direção de uma sociedade mais consciente e sustentável (Jabbour *et al.*, 2018).

Para Santos (2018), a Quarta Revolução Industrial será formada, sobretudo, com base em mudanças nos ambientes de produção obtidas com o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias. Será possível tornar os processos de negócio mais produtivos, flexíveis e adaptáveis, além de melhorar o relacionamento com os clientes e com outras organizações da cadeia de valor. As Fábricas inteligentes, com tomada de decisão em tempo real, passarão a compor novos sistemas, de maior complexidade e abrangência, dessa forma, criando melhores sistemas de informações. Nesse sentido, novas competências dos trabalhadores serão exigidas, a fim de obter um aumento na relação homem-máquina. Com isso, novas ocupações e novos modelos de negócios serão formados.

Para Costa e Gouveia (2021), esse panorama é de mudança: competição, demandas, tecnologias, comportamento e as expectativas dos clientes são cada vez mais exigentes e intensas. Essa Quarta Revolução Industrial pode abrir oportunidades para que as Pequenas e Médias Empresas (PME's) modifiquem suas estruturas, seus modelos de negócios e suas rotinas, a fim de enfrentar os desafios da Indústria 4.0. Pode ser um momento adequado para as empresas avaliarem seu atual modelo de negócios para oportunidades em potencial que podem surgir, até como saída para superar crises e adaptá-lo a este novo cenário.

Nos últimos anos, novas tecnologias emergentes, como computação em nuvem, sistemas ciber físicos, redes de sensores sem fio, *Big Data* e Internet móvel, foram introduzidas no ambiente de fabricação. A fusão da manufatura com essas novas tecnologias está permitindo uma transformação revolucionária em termos de modelos e abordagens de manufatura, levando a um novo conceito chamado Indústria 4.0. O termo "Indústria 4.0" foi usado pela primeira vez em 2011 como parte da iniciativa do governo alemão que o estabeleceu como uma estratégia crítica para a produção industrial (Huang; Chicoma; Huang, 2019).

Contudo, de acordo com Santos *et al.* (2018), uma grande mudança econômica e industrial trará novos objetivos e determinará outros conceitos dentro das empresas. Os desafios da Indústria 4.0 forçam os gerentes das PME's a avaliarem se estão preparados e se possuem condições e recursos para tais mudanças.

Dúvidas como qual a situação das organizações e em qual tecnologia podem e devem investir no futuro próximo; como avaliar e analisar o estado atual dos negócios no contexto da Indústria 4.0 rondam as organizações de pequeno e médio porte e podem estar relacionadas à indisponibilidade de modelos claros de maturidade digital de natureza descritiva e prescritiva, que forneçam análises e orientações para que os setores dessas empresas possam encontrar caminhos para a sua jornada de transformação digital (Costa; Gouveia, 2021).

Esse novo cenário da Quarta Revolução Industrial permite a possibilidade de obter melhores resultados em produtividade, com maior sustentabilidade e flexibilidade, intensifica mudanças na sociedade e no desenvolvimento econômico local ou nacional; com isso, estimula novas pesquisas acadêmicas, como a proposta de modelos que sejam capazes de medir o nível de maturidade e a prontidão tecnológica de uma empresa de manufatura para a Indústria 4.0.

Acredita-se que seja fundamental a criação de um modelo de prontidão tecnológica e maturidade para avaliar o nível em que se encontram as empresas que procuram compreender e implementar os valores e exigências da Quarta Revolução Industrial. Com isso, busca-se contribuir para que essas organizações possam iniciar um desenvolvimento tecnológico e digital, de uma maneira que consigam medir qual o nível de maturidade e a prontidão tecnológica em que se encontram, e contribuir para que seus diretores consigam compreender as novas condições de progredir tecnologicamente em seus sistemas e processos; e dessa forma, melhorar os resultados organizacionais, com sustentabilidade, integrar as novas tecnologias, agilizar, ter uma gestão em tempo real, adaptar e flexibilizar (De Carolis *et al.*, 2017).

Diante do exposto, apresenta-se o problema de pesquisa deste trabalho, seus objetivos, justificativas, delimitação e organização do estudo.

1.1 Problema da pesquisa

A partir de estudos em empresas de manufatura para a implantação da Indústria 4.0, emerge o seguinte problema de pesquisa: Qual é a relação entre a prontidão

tecnológica e a maturidade das empresas de manufatura no contexto da implantação da Indústria 4.0?

Nesse contexto, este trabalho foi desenvolvido com a seguinte hipótese:

H1: O Índice de Maturidade Indústria 4.0 da empresa influencia de forma positiva a Prontidão Tecnológica.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a relação entre a prontidão tecnológica e a maturidade das empresas de manufatura no contexto da Indústria 4.0.

1.2.2 Objetivos específicos da pesquisa

- Avaliar como as dimensões, definidas para o modelo deste estudo, contribuem para avaliar a maturidade das empresas de manufatura;
- Identificar as tecnologias que as organizações possuem e/ou utilizam e avaliar a prontidão tecnológica dessas empresas para a implantação da Indústria 4.0;
- Medir a relação da prontidão tecnológica com a maturidade das empresas.

1.3 Justificativa e relevância da pesquisa

As tecnologias não surgem prontas para uma aplicação imediata, pois tem-se apenas uma ideia de seu possível emprego no início, para depois realizar um desenvolvimento adequado para customizá-la à sua utilização. Desde que uma nova tecnologia é criada, esta deve estar sujeita a experimentação, simulação, refinamento, prototipagem e ensaios de desempenho, até que possa estar preparada para a sua utilização e comercialização. Para que uma inovação ocorra satisfatoriamente, há uma

necessidade de obter certos níveis de maturidade da tecnologia claramente delimitados, descritos e normalizados (Velho *et al.*, 2017).

No conceito da Indústria 4.0, a conexão entre humanos, objetos e sistemas formará novas redes nas empresas que serão dinâmicas, otimizadas em tempo real e auto-organizadas. Para inovar e adotar essa nova forma de produzir, ocorrerá um impacto em todos os processos da organização (Mohamed, 2018).

Para a aplicação de um modelo de prontidão tecnológica e maturidade que demonstre resultados importantes, confiáveis e transparentes, este deve ser organizado e estruturado sequencialmente para obter a maior abrangência possível da organização analisada.

Segundo Costa e Gouveia (2021), a utilização de modelos de transformação digital para avaliar a maturidade digital, a orientação e a recomendação de como as empresas do Brasil devem atuar ainda está muito longe de ser uma realidade. Os autores recomendam realizar estudos de caso em pequenas e médias empresas brasileiras com base no modelo que desenvolveram.

Justifica-se o tema deste trabalho devido ao impacto organizacional que este novo modelo de processo e negócio gerado pela Indústria 4.0 exigirá, para subsistência, das empresas de todos os tamanhos e setores, além de uma adequação a novos conceitos e tecnologias.

Neste contexto, é primordial a apresentação de um modelo de prontidão tecnológica e maturidade que possa ser analisado e testado para auxiliar as empresas de manufatura e seus gestores no desafio de implantar a Indústria 4.0, com informações sobre o atual cenário e estágio tecnológico em que suas organizações se encontram e qual a maturidade e quais recursos que ainda serão necessários para essa implantação e como priorizar os passos na adequação de suas empresas a essa Quarta Revolução Industrial.

1.4 Delimitação do estudo

O estudo abrange empresas de manufatura da Região do Grande ABC, que é considerada um dos principais polos industriais do país e também um dos mais

relevantes no cenário econômico da América Latina (Xavier *et al.*, 2007), e por esta razão foi escolhida para este estudo.

1.5 Organização do estudo

Buscando atingir seus objetivos, a presente tese está estruturada em seis (6) capítulos. Neste primeiro tem-se a introdução com o problema da pesquisa, os objetivos, a justificativa e a delimitação do estudo.

No segundo capítulo apresenta-se a fundamentação teórica acerca da Quarta Revolução Industrial, conceito, surgimento, desafios, dificuldades, as principais tecnologias e seus componentes relevantes. Contextualiza-se a Indústria 4.0 nas empresas e são descritos também outros modelos de prontidão tecnológica e maturidade das empresas, que nortearam e serviram de referência para a definição do modelo desenvolvido e proposto para este estudo.

Os procedimentos metodológicos são apresentados no terceiro capítulo. A partir de outros modelos de maturidade e prontidão tecnológica apresentados no item 2.2 deste trabalho, desenvolveu-se um modelo, especificando seus indicadores e dimensões. A pesquisa constituiu-se da criação e adequação deste modelo, a fim de aperfeiçoar o mesmo, validado por meio de entrevistas com especialistas - profissionais participantes das empresas de manufatura - e com professores universitários a respeito dos modelos de prontidão tecnológica e maturidade existentes e suas respectivas características e dimensões.

O modelo proposto com suas dimensões apresenta indicadores que estão contidos no instrumento de pesquisa para serem avaliados, o qual foi desenvolvido em formato de questionário e em seguida utilizado em uma pesquisa quantitativa deste estudo, com o intuito de obter e entender em que nível de maturidade e qual a prontidão tecnológica as empresas de manufatura se encontram. Busca auxiliar essas empresas de como devem proceder para uma melhor adaptação à Quarta Revolução Industrial.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados identificando o nível de maturidade e a prontidão tecnológica das empresas de manufatura, analisando, com

base nas respostas dos gestores, administradores e profissionais de TI dessas organizações, como estão em relação à implantação da Indústria 4.0, além de identificar os motivos que levaram a esse resultado e propor aos gestores quais os melhores caminhos ou quais os menos sinuosos para uma efetiva e satisfatória implantação da Indústria 4.0.

No quinto capítulo, apresenta-se uma discussão dos resultados e, por fim, no sexto capítulo apresentam-se as considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Considerando que muitos dos problemas atuais das empresas foram resolvidos com soluções de tecnologia de última geração, embora não sejam aplicadas diariamente, é importante e necessário ter ferramentas confiáveis que possam informar o maior número de soluções de forma rápida e fácil, sendo extremamente relevante para as empresas no processo de tomada de decisão. As indústrias necessitam de sistemas de informação integrados que possam abranger todo o processo de produção de novos produtos (Urbikain *et al.*, 2017).

A Quarta Revolução Industrial tem um papel importante na transformação digital completa da indústria porque representa um avanço na digitalização da produção, automação com sistemas integrados para obtenção de dados das linhas de produção e utilização de máquinas e conexão on-line com sistemas de manufatura em uma cadeia de suprimentos abrangente com troca automática de dados. A mudança da indústria digital na Internet ocorre constantemente e Inteligência Artificial (IA), *Big Data* e conectividade indicam a certeza de uma nova revolução digital (Roblek; Meskko; Krapez, 2016).

Em uma fábrica com tecnologia avançada, as máquinas estão ligadas como se fossem uma grande rede colaborativa. Essa conexão exige a utilização de ferramentas de informática avançadas que possam fazer previsões, para que os dados consigam ser sistematicamente processados em informações para explicar as incertezas e, assim, os gestores tomarem as melhores decisões com informações mais rápidas e precisas. As inovações de produção e serviços baseadas em CPS são tendências inteligentes e desafios inevitáveis para as empresas fabris alcançarem maior produtividade e transparência (Lee; Kao; Yang, 2014).

A Alemanha está liderando uma transformação em direção à Quarta Revolução Industrial com base na manufatura habilitada para os CPS e na inovação de serviços. Em um cenário de competitividade cada vez maior, as empresas estão enfrentando novos desafios ao lidar com problemas de inúmeros dados para tomada de decisões rápida a fim de melhorar a produtividade. Muitos sistemas de manufatura não estão prontos para gerenciar esse grande volume de dados por conta da escassez de processos de análises inteligentes. As tecnologias serão utilizadas também para

prever as falhas no desempenho da produção, gerenciar e otimizar de forma autônoma os serviços dos produtos e suas necessidades (Lee; Kao; Yang, 2014).

O surgimento das tecnologias da Quarta Revolução Industrial mostra o enorme potencial que há para evoluir nas ações tradicionais de gestão da produção. Em tempo real, será possível analisar e coletar dados de produção em massa, embora ainda haja pouca pesquisa sobre a utilização de dados simultâneos para apoiar as decisões de produtividade por conta de incertezas. Assim, um dos desafios será aproveitar os dados em tempo real coletados em ambientes da Indústria 4.0 para suportar os gestores em suas decisões nos processos de produção e obter um gerenciamento de operações coordenado e eficaz (Li; Huang, 2021).

2.1 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 definirá o futuro das indústrias e como serão seus processos produtivos. Criará novos modelos de negócios por meio dos CPS para, dessa forma, detalhar suas dimensões organizacionais e obter maiores eficiências no ambiente de negócios. Novos aspectos serão abordados e selecionados para descrever a visão do futuro da Quarta Revolução Industrial (Erboz, 2017).

Culot *et al.* (2020) contribuíram na definição do conceito de Indústria 4.0 de três (3) maneiras: forneceram uma análise de uma perspectiva para nortear os pesquisadores com a definição atual da Indústria 4.0 e com outros conceitos como operações e fábricas inteligentes e computação em nuvem; identificaram uma série de dimensões e subdimensões que caracterizam a Quarta Revolução Industrial em seus aspectos tecnológicos e não tecnológicos e, por fim, também destacaram algumas oportunidades para futuros estudos que busquem estabelecer os fundamentos teóricos da Indústria 4.0. Na contribuição prática, os autores destacam a complexidade e a multidisciplinaridade desse novo conceito frente aos procedimentos usualmente utilizados no gerenciamento das organizações.

A Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0 refere-se a um novo modelo com avanços tecnológicos, no qual a Internet e as tecnologias de suporte servem como base para integrar objetos físicos, máquinas inteligentes, pessoas, linhas fabris e

processos por meio dos limites organizacionais para formar um novo tipo de rede inteligente e cadeia de suprimentos ágil (Schumacher; Erol; Sihn, 2016).

Culot *et al.* (2020) destacam a Indústria 4.0 não como tecnologia “*plug-and-play*”, mas como um novo conceito que requer uma série de inovações nas práticas organizacionais alinhadas com fatores contextuais. Acreditam que, como a Indústria 4.0 ainda está em construção, existem enormes oportunidades para pesquisas futuras, uma vez que a comunidade científica está testemunhando uma revolução “anunciada”, há espaço para assumir um papel ativo no fornecimento de informações e apoiar o entendimento e a compreensão dessa nova realidade.

A primeira revolução industrial foi a introdução de instalações de produção mecânica a partir da segunda metade do século XVIII e se fortificou ao longo de todo o século XIX. A partir da década de 1870, a eletricidade e a divisão do trabalho levaram à segunda revolução industrial. A terceira revolução industrial ocorreu quando a eletrônica avançada e a TI desenvolveram ainda mais a automação dos processos de produção. Chamada de “revolução digital”, ocorreu por volta da década de 1970 (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

Segundo Santos *et al.* (2018), a indústria tem passado por transformações nos processos da produção, como também nos de gestão. Essas transformações mudaram não só a economia, com o crescimento da produtividade, mas também alteraram significativamente o cotidiano das pessoas.

Para Coelho (2016), os termos Indústria 4.0 e “*Smart factory*” descrevem uma visão do que será uma fábrica no futuro. Na visão do autor, as fábricas passarão a operar com muito mais inteligência, flexibilidade, dinamismo e agilidade. “*Smart factory*”, por sua vez, terá outra definição, será uma fábrica na qual produtos inteligentes serão fabricados, com o uso de equipamentos inteligentes, em cadeias de suprimentos inteligentes.

Segundo Pech e Vrchota (2020), a Indústria 4.0 é considerada um método revolucionário de produção. Ele traz uma nova perspectiva sobre a sinergia da produção com tecnologias modernas, a produção máxima possível e os recursos mínimos usados. A nova revolução industrial está mudando as regras da concorrência, pois os modelos de negócios estão mudando completamente com a digitalização das fábricas e a adoção do conceito de Internet das Coisas. O moderno conceito da

Indústria 4.0 foi originalmente concebido como uma iniciativa nacional para o desenvolvimento da economia alemã em 2011.

A Indústria 4.0 indica uma revolução industrial centrada em Sistemas Ciber Físicos. Destacam que uma conexão em tempo real de sistemas físicos e digitais, juntamente com novas tecnologias facilitadoras, mudará a maneira como o trabalho é feito e, portanto, como deve ser gerenciado. Tem o potencial de modificar as decisões tradicionais das operações entre as prioridades competitivas de custo, flexibilidade, velocidade e qualidade (Olsen; Tomlin, 2020).

A Indústria 4.0 é, para muitos, uma poderosa e nova onda industrial, que é orientada para tecnologias digitais e virtuais e é centrada em serviços. Esse movimento resultou no advento do termo “Indústria 4.0”, apoiado pelo governo alemão, de acordo com Drath e Horch (2014).

O conceito de Indústria 4.0 como a Quarta Revolução Industrial tem se tornado um tema cada vez mais importante, sendo discutido e pesquisado por acadêmicos, consultores e empresas. Mas ainda existem algumas ideias vagas sobre esse novo paradigma de fabricação, no tocante às suas implicações e consequências. Além disso, a maioria das empresas e fábricas não estão conscientes dos desafios que podem enfrentar quando desejarem implementar os avanços da Indústria 4.0. Esse novo sistema de produção possibilita que as empresas tomem medidas para estarem preparadas para essa mudança, determinando um modelo de fabricação mais inteligente e adequado, para planejar os futuros roteiros a serem seguidos para enfrentar os futuros desafios da indústria (Mohamed, 2018).

Os sistemas inteligentes e os dados gerados por eles têm um papel importante nos níveis de desempenho das empresas, eficiência de custos, qualidade e processos livres de falhas. Além disso, é necessário desenvolver a capacidade de dados e estatísticas dos países para se preparar para os desenvolvimentos tecnológicos da Indústria 4.0. As estratégias possibilitadas transformarão as indústrias de manufatura em redes inteligentes mais integradas com melhor acesso a dados e em tempo real. Na Quarta Revolução Industrial as tecnologias de cadeia de valor e os componentes são categorizados como Internet das Coisas, Sistemas Ciber Físicos, Internet de Serviços e Fábrica Inteligente. Em uma visão abrangente sobre as novas tecnologias, a computação visual poderá ser vista como o componente-chave da Indústria 4.0,

além de aumentar o conhecimento da Indústria 4.0 e suas dimensões para aumentar a competitividade das empresas (Erboz, 2017).

Na busca em atender os desafios atuais, surge a Indústria 4.0, a qual proporciona uma gama de novas tecnologias modernas e avançadas. Os elementos estão surgindo com mais força como um dos principais objetivos da gestão estratégica nos últimos anos. A utilização dessas novas tecnologias necessita de investimentos estratégicos e de longo prazo, que visa aumentar a competitividade das empresas no futuro. Há empresas que já estão implementando tecnologias e processos inteligentes. Algumas delas indicam sua experiência com essas tecnologias de forma prática ao menos parcialmente. Isso significa que elas concluíram a implementação com sucesso e agora estão procurando o valor agregado que essas tecnologias oferecem. Portanto, sua utilização ainda é parcial, utilizada para lidar com certas questões e provavelmente sem a integração geral com todos os sistemas de todas as áreas (Vrchota; Pech, 2019).

Após a Alemanha anunciar a Indústria 4.0 como uma das principais iniciativas da estratégia de alta tecnologia em 2011, inúmeras publicações acadêmicas, conferências e artigos científicos enfocaram esse tópico. A integração da produção industrial com as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), denominada Indústria 4.0, é atualmente um dos assuntos mais discutidos entre acadêmicos e profissionais da Alemanha (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

A comunidade acadêmica da administração da produção e operações tem um desafio de se envolver com a Indústria 4.0 para entender as implicações e limitações dessa revolução e ajudar a desenvolver os conceitos e técnicas que impulsionarão ainda mais seu potencial e adoção. É necessário e fundamental dotar o corpo discente com o conhecimento e as habilidades necessárias para gerenciar as novas operações e as novas realidades da cadeia de suprimentos que surgirão. Precisa-se explorar como as tecnologias que suportam a Indústria 4.0 desafiarão a compreensão atual das operações e também identificar as novas e importantes questões operacionais que surgirão com o avanço e a adoção dessas tecnologias (Olsen; Tomlin, 2020).

Com várias tecnologias fundamentais da Indústria 4.0 tem-se dois objetivos: (1) aumentar a conscientização e a compreensão da Indústria 4.0 na comunidade acadêmica de gerenciamento de operações; e (2) incentivar a pesquisa nessa área,

identificando oportunidades e desafios. Com esses objetivos em mente, o foco será na atenção e nas implicações operacionais dessas tecnologias subjacentes. De acordo com o foco da Indústria 4.0, a concentração não se dará na prestação de serviços, mas sim, na fabricação de produtos (Olsen; Tomlin, 2020).

A Indústria 4.0 terá uma implicação significativa na forma como a organização funciona e se organiza para a cultura de seu trabalho. A cultura de inovação aberta e colaboração entre empresas será mais relevante nesta era. Uma cultura interna, como infraestrutura, propriedade intelectual, cultura digital, padrões, normas e certificações, será a chave para implementar a cultura da Indústria 4.0 na empresa. Assim, as organizações devem adotar e absorver a cultura digital e se comparar com outras organizações externas em relação a sua cultura e futuros desejáveis (Hajoary, 2020).

Durante a revolução tecnológica da Indústria 4.0, espera-se que os empresários das PME's tomem iniciativas para garantir uma cultura de trabalho que utilize as capacidades de inovação das pessoas e da organização para um melhor desempenho de produtos e processos, o que levará a um melhor desempenho de mercado (Govindarajo *et al.*, 2021).

À medida que novas teorias e métodos surgem ao longo do tempo, espera-se que o conceito para avaliar o *status* atual e futuro desejável das organizações se fortaleça entre pesquisadores e profissionais da indústria. Os modelos de maturidade e prontidão tecnológica para a Indústria 4.0 foram estruturados em cinco (5) níveis ou estágios: nível 1 como estranho ou ausência; nível 2 como iniciante ou existência; nível 3 como intermediário ou sobrevivência; nível 4 como experiência ou maturidade; e nível 5 como um especialista ou de alto desempenho (Hajoary, 2020). O autor concluiu que a Alemanha está atualmente liderando o desenvolvimento do modelo de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0.

Com a Indústria 4.0 se tornando uma prioridade para muitos centros de pesquisa, universidades e empresas, as múltiplas contribuições de acadêmicos e os praticantes tornaram o significado do termo mais confuso do que concreto. Há certo deslumbramento pela Indústria 4.0 por dois (2) motivos: (1) Pela primeira vez, uma revolução industrial é prevista, e não observada somente após sua ocorrência. Isso possibilitará várias oportunidades para empresas e institutos de pesquisa planejarem e moldarem ativamente seu futuro; (2) O impacto tecnológico, econômico e até social

desta Quarta Revolução é supostamente gigantesco, já que a Indústria 4.0 pode oferecer um crescimento considerável no conhecimento dos envolvidos e na eficácia produtiva, assim como a criação de novos modelos de negócios, serviços e produtos (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

Para Dantas *et al.* (2018), o mercado atual se torna cada vez mais global e as empresas precisam se desenvolver de forma rápida para se manterem competitivas. Diante desse cenário, estas precisam abandonar a produção industrial clássica e, por meio do progresso das conquistas tecnológicas modernas, como as redes de comunicação e a Internet, se encaminhar a desenvolver e introduzir uma nova era focada na comunicação.

A base da Quarta Revolução Industrial está no desenvolvimento da TIC, na automação inteligente com CPS e na conectividade com a IoT. Esse movimento possui tecnologias que podem facilitar o caminho para a implantação dos conceitos de uma economia circular (Jabbour *et al.*, 2018). Hermann, Pentek e Otto (2016) também ratificam esse conceito e citam três (3) componentes principais da Indústria 4.0: os CPS, a *Smart Factory* e a IoT.

A prototipagem virtual e aumentada fornece uma compreensão completa dos recursos e benefícios dos produtos, facilitando a exploração de todas as funcionalidades destes entre todos os envolvidos interessados. A integração de produtos inteligentes com produção inteligente, logística inteligente, redes inteligentes e IoT, proporciona benefícios que a Indústria 4.0 resulta na mudança das atuais cadeias de valor e no desenvolvimento de modelos de negócios inovadores, tornando a fábrica inteligente o elemento-chave das futuras infraestruturas inteligentes. A partir dessa nova perspectiva de infraestrutura, vários benefícios e lucros poderão ser obtidos (Mohamed, 2018).

São consideradas características associadas às tecnologias da Indústria 4.0: digitalização, conexão, capacidade de interoperação, adaptação, eficiência, capacidade de previsão e reconfiguração. Essas tecnologias têm por objetivo colocar o conhecimento em sistemas digitais e estão fortemente conectadas aos CPS e à IoT, (Gunes *et al.*, 2014).

Essa revolução pode trazer muitos benefícios para as empresas em diferentes dimensões, como a redução de custos trabalhistas, a simplificação dos processos de

negócios e a otimização dos estoques, além de mais transparência nos processos logísticos. Tudo isso será fundamental para o aumento da produtividade e da receita para, com isso, estimular o crescimento econômico. Será uma nova maneira de fazer negócios e uma nova fonte de criação de valor, em especial para empresas fabris tradicionais (Mohamed, 2018).

Para Coelho (2016), a Indústria 4.0 vai impactar além de processos simples de digitalização e passar por uma maneira muito mais complexa de inovar tendo por base uma série de tecnologias avançadas, que exigirá das empresas novas formas de pensar, como gerir seus processos de negócios, como se posicionar na cadeia de valor, como pensar no desenvolvimento de novos produtos e também os introduzir no mercado, ajustando as ações de marketing e de distribuição.

Um dos pontos-chave da Indústria 4.0 é o valor e a importância cada vez maior dos dados. As empresas precisam pensar nos dados como um patrimônio, uma matéria-prima preciosa; precisarão modificar a maneira como pensam e realizam a gestão de dados e informações em volumes cada vez maiores. Esse será um dos maiores desafios para as empresas de manufatura tradicionais. Poderão atingir vários benefícios (entre os quais: personalização; alocação mais dinâmica de recursos/capacidade; tempos de troca mais curtos; e complexidade de produção reduzida com menos restrições), o que poderá permitir processos de produção mais rápidos, baratos, fáceis e diversificados (Mohamed, 2018).

Habilitada pela comunicação entre pessoas, máquinas e recursos, a Quarta Revolução Industrial é caracterizada por uma mudança de paradigma de processos de produção controlados centralmente para processos de produção descentralizados. Os produtos inteligentes conhecem seu histórico de produção, seu estado atual e de destino e se orientam ativamente pelo processo de produção, instruindo as máquinas a realizarem as tarefas de fabricação necessárias e solicitando transportadores para o transporte para o próximo estágio de produção (Schwab, 2016).

Consequentemente, o aumento da complexidade em todos os níveis da empresa pode gerar incertezas sobre as respectivas capacidades organizacionais e tecnológicas e estratégias adequadas para desenvolvê-las (Schumacher; Erol; Sihn, 2016).

De acordo com Schwab (2016), é preciso perceber que as alterações irão verificar, em ambos os lados da cadeia de suprimentos, tanto o nível das exigências dos clientes como o dos parceiros de negócio. De acordo com o autor, são quatro (4) as principais alterações esperadas na Indústria em geral:

- Alterações nas expectativas dos clientes;
- Produtos mais inteligentes e mais produtivos;
- Novas formas de colaboração e parcerias;
- A transformação do modelo operacional e conversão em modelo digital.

Segundo Coelho (2016), a inovação colaborativa impulsionará condições em pontos-chave que poderão se traduzir em vantagens competitivas e, assim, será considerada um impulso para o desenvolvimento social e econômico. Essa mudança de paradigma forçará as empresas a pensarem em um novo modelo de operações, dotando-as de maior agilidade e adaptabilidade a um cenário organizacional em constante mudança, no qual a concorrência terá complexidade cada vez maior.

Para Jabbour *et al.* (2018), os conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 poderão influenciar a forma como os produtos serão fabricados, bem como a percepção dos clientes sobre o valor desses produtos. Os produtos poderão ser projetados para conter uma identificação eletrônica exclusiva para rastrear o ciclo de vida do produto. Isso permitirá a coleta de dados sobre o uso, o que, por sua vez, poderá ajudar as empresas a compreenderem os padrões de consumo, melhorarem a personalização de produtos e aprimorarem os aspectos de serviço dos produtos, como serviços de manutenção, serviços de atualização e assim por diante.

As conexões entre máquinas, dispositivos e camadas da cadeia de abastecimento, por meio de informações compartilhadas em tempo real, criarão a possibilidade de modificar rapidamente as prioridades de produção e compra, monitorar e controlar o desempenho da produção das linhas, rastrear as entregas e melhorar as rotas logísticas (Jabbour *et al.*, 2018).

A Indústria 4.0 integrou humanos com máquinas e processos de produção para criar uma cadeia de valor inteligente (Schumacher; Erol; Sihn, 2016).

A falta de conhecimento dos fatores de sustentabilidade tem levado inúmeras empresas a grandes perdas financeiras. Os países desenvolvidos atingiram resultados

positivos em seus processos fabris com a sustentabilidade, o que não ocorre com os países em desenvolvimento que apresentam índices bem menores na adoção da sustentabilidade. As novas tecnologias, em especial para o setor manufatureiro, sob a temática da Indústria 4.0, como IoT, CPS, *Big Data Analytics*, *Smart Factory*, entre outras, devem ser a tendência dos negócios no futuro. Vale ressaltar que essas tecnologias avançadas irão contribuir com a sustentabilidade de forma direta ou indireta. Sendo a sustentabilidade um dos temas emergentes mais importantes no mercado global, é fundamental e necessário aplicar ações que busquem a adoção da sustentabilidade (Yadav *et al.*, 2020).

As tecnologias da Quarta Revolução Industrial podem permitir alocação eficiente de recursos, como materiais, energia, água e produtos, usando dados em tempo real de sistemas produtivos e parceiros da cadeia de suprimentos. Esse desenvolvimento em direção à Quarta Revolução Industrial proporciona oportunidades enormes para a execução de uma fábrica sustentável e, usando a infraestrutura de TIC, resultará em decisões de produção mais sustentáveis (Stock; Seliger, 2016).

Segundo Amorim (2017), a economia mundial tende a deparar-se, cada vez mais, com a Indústria 4.0. Essa tendência deve-se, sobretudo, à importância dada à Quarta Revolução Industrial pelos países mais desenvolvidos, que enxergam, nela, uma oportunidade de fomentar a competitividade entre as indústrias, por meio de uma alta produtividade a baixo custo, gerando assim, novos negócios. Com isso, reforça o papel imprescindível da análise das suas consequências econômicas e sociais.

Assim, todas essas ferramentas com tecnologias avançadas podem auxiliar a Indústria 4.0 a se enquadrar na economia circular, ao mesmo tempo que se podem criar valores para os clientes por meio dessas tecnologias, diminuir os impactos ambientais gerados e a utilização de matérias virgens, o que pode aumentar a satisfação dos *stakeholders* (Dantas *et al.*, 2018).

A atual tendência de fabricação na Indústria 4.0 oferece novas tecnologias-chave, como, CPS, IoT, manufatura aditiva, *Big Data Analysis* entre outras. A falta de conhecimento dos aspectos de sustentabilidade leva as organizações a perdas financeiras consideráveis, além de uma reputação negativa no mercado. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, devido à forte infraestrutura, as economias desenvolvidas alcançam a sustentabilidade em seus setores de manufatura, mas as

práticas de sustentabilidade nas economias emergentes ainda são limitadas. Com a industrialização, a sustentabilidade surge como uma questão crucial no mercado internacional. A identificação de facilitadores para a sustentabilidade é necessária, pois espera-se que esse tema evolua e sejam adotadas políticas nesse sentido e que os gestores busquem melhorar a sustentabilidade com a utilização da Indústria 4.0 em PME's (Jamwal *et al.*, 2021).

Amorim (2017) destaca o papel fundamental das tecnologias advindas da Quarta Revolução Industrial na obtenção de vantagens competitivas por parte dos países mais desenvolvidos. Nesse sentido, por meio da indústria 4.0, as empresas desses países terão a possibilidade de aumentar a produção e reduzir seus custos. Dessa forma, esses países poderão, cada vez mais, desenvolver suas economias, gerar riquezas e, principalmente, voltar à rede internacional de produção e distribuição das grandes empresas em escala mundial. Portanto, o autor descreve a Indústria 4.0 como a melhor via para os Estados desenvolvidos aumentarem sua competitividade e fomentarem suas economias, o que, conseqüentemente, aumentará as suas respectivas produções de riquezas, as quais, depois, serão convertidas em bem-estar social.

Para Jabbour *et al.* (2018), a indústria 4.0 e a sustentabilidade são consideradas tendências importantes no atual sistema de produção. Propõem que, embora não possam ser individualmente consideradas novas revoluções industriais, por meio de sua sobreposição e sinergia podem, juntas, constituir uma onda industrial distinta que mudará para sempre os sistemas de produção mundiais. Isso se deve ao potencial que a Indústria 4.0 tem para desbloquear totalmente a indústria e a sustentabilidade por meio de sua tecnologia, caminhando em direção a uma sociedade mais sustentável.

Há uma necessidade de gestões justas e conscientes que busquem, além da sustentabilidade, reduzir as desigualdades para um resultado positivo no mercado de trabalho e na sociedade em geral. É preciso estar ciente do fato de que somente o aumento de competitividade venha resultar melhores resultados da produção de grandes companhias dos países desenvolvidos, o que, conseqüentemente, gera um ganho da economia nacional, mas não trará, necessariamente, aumento no número de postos de trabalho (Amorim, 2017).

As tecnologias específicas discutidas dessa inovação serão descritas no próximo item deste trabalho, que inclui: CPS, IoT, computação em nuvem, *Big Data*, computação visual, dispositivos e aplicações móveis, equipamentos autônomos, IA e manufatura aditiva.

2.1.1 Principais tecnologias e componentes relevantes da Indústria 4.0

Definida como a integração de simulação, visualização 3D e análise, a Manufatura Digital (DM) é uma tendência dos últimos 20 anos. A partir da Manufatura Integrada por Computador (CIM), a manufatura digital evoluiu orientada pela necessidade de uma maior colaboração entre o projeto do produto e o planejamento do processo. As ferramentas de simulação 3D abriram a implementação de máquinas de modelo virtual, robôs, células de trabalho e montagens no ambiente de produção. Porém, sem uma estratégia de produção digital integrada, muitos dos benefícios de longo prazo do *Product Lifecycle Management* (PLM) não podem ser alcançados (Urbikain *et al.*, 2017).

Um melhor entendimento das tecnologias, que serão a base para o desenvolvimento de produtos e serviços, será fundamental para melhor compreender as transformações possíveis e esperadas com a implantação da Indústria 4.0. Podem ajudar também na compreensão dos benefícios que essas trarão para se aplicar na indústria (Gunes *et al.*, 2014).

O conceito de máquina virtual (VM) faz referência à reprodução de um modelo virtual completo de uma máquina, seus processos e dispositivos auxiliares. Isso permite visualizar a viabilidade de um processo sem usar nenhum teste real. Se a avaliação for positiva, as operações são traduzidas na instalação de produção real. Seguindo a linha que partiu das ideias de manufatura digital e virtual, o conceito de ferramenta de máquina virtual (VMT – *Virtual Machine Tool*) surge como uma plataforma de software multiabordagem na qual os usuários podem interagir para avaliar diferentes arquiteturas de ferramenta de máquina (Urbikain *et al.*, 2017).

A seguir apresentam-se os componentes relevantes da Indústria 4.0:

- Digitalização: É fundamental para a obtenção de dados on-line em tempo real.

Com os equipamentos e produtos digitalizados será possível comunicar, operar e controlar remotamente os processos de negócio principais, e também a fabricação, a distribuição aos clientes e o desenvolvimento de produtos e serviços.

- **Conectividade:** A conexão entre pessoas, máquinas, dispositivos móveis, sensores e produtos, por meio de uma comunicação de redes WiFi e o intercâmbio de informações por meio da Internet, desempenhará um papel fundamental para essa comunicação, que poderá ser de três (3) formas: homem-homem, máquina-máquina e homem-máquina.
- **Interoperabilidade:** refere-se aos sistemas de informação terem a capacidade de serem executados de forma conjunta, com intercâmbio de informações e sendo utilizadas para a execução de ações específicas. Embora sejam sistemas heterogêneos, com funções diferentes, a troca de dados precisa ser executada de forma íntegra e segura. Esses sistemas podem ser de uma organização apenas, ou de várias, o que faz com que a padronização da troca de dados seja necessária para uma comunicação satisfatória.
- **Adaptabilidade:** É a capacidade de um sistema poder alterar seu próprio estado, e ajustar sua configuração para se adequar às mudanças. É uma das características fundamentais dos sistemas que serão executados, em tempo real, com grandes volumes de dados (*Big Data*), e isso será visto em sistemas inteligentes e descentralizados.
- **Escalabilidade:** É a capacidade, mesmo com o crescimento do volume de trabalho, de os sistemas manterem-se em pleno funcionamento, proporcionando as respostas esperadas. O aumento de recursos adicionados ao sistema precisa ser proporcional ao aumento do volume de saídas. A capacidade flexível de o sistema se adequar a variações e mudanças do volume de demanda é um atributo também inserido nessa capacidade.
- **Eficiência:** Está relacionada com a otimização da quantidade de recursos exigidos por um sistema para entregar determinados resultados. Um sistema com grande eficiência deve ser executado de maneira adequada com recursos suficientes ao sistema, ou seja, com o menor possível ou até sem nenhum tipo de desperdício ou ociosidade de recursos. Sistemas com maior eficiência serão

frutos de uma maior comunicação entre esses e a introdução de inteligência.

- Capacidade preditiva: É a capacidade de um sistema prever seu próprio estado, funcionalidade ou comportamento, por meio do histórico dos dados, algoritmos de compreensão de padrões e de informações em tempo real, para atingir objetivos específicos, com qualidade ou quantidade. Sistemas inteligentes e autônomos também serão suportados por essa capacidade.
- Reconfigurabilidade: É a capacidade, no caso de erros ou em função de requisições do ambiente interno ou externo, de o sistema alterar sua própria configuração. Ter autoconfiguração, assim como de seus componentes é condição dos sistemas com grande reconfigurabilidade. Podem ser produtos e equipamentos únicos, ou até a linha de produção por completa. Está relacionada ao estado da arte da I4.0, em uma ampla oportunidade de pesquisa e desenvolvimento de soluções de produção.

A comunicação entre as máquinas e seus usuários será disseminada por meio de conexões digitais em tempo real. Os processos de produção estarão disponíveis e serão gerenciados no espaço virtual, enquanto as TIC dominarão os futuros modelos de negócios (Szozda, 2017).

Muitas organizações buscam constantemente otimizar e utilizar o máximo de suas instalações de produção. Com a utilização de “máquinas virtuais”, será possível a redução e talvez até a eliminação da ociosidade nos processos produtivos, ao invés da tradicional verificação de programas e processos “passo a passo”, o VMT poderá realizar a verificação em microcomputadores comuns.

A lógica organizacional do sistema virtual é separada em dois eixos funcionais. Um eixo no qual a estrutura da máquina-ferramenta é caracterizada com algumas condições de cargas, temperatura, entre outros; outro eixo relacionado aos erros associados e ao movimento dos elementos da máquina. Um VMT funcional deve prever as forças de corte, variações de temperatura e o resultado final, que será a dimensão. Essa abordagem sobre o tema foi viabilizada, uma vez que não há modelos de processos profundos incluídos no VMT, até hoje os modelos de processos com a inclusão no VMT são bastante simples (Urbikain *et al.*, 2017).

Nos próximos itens apresenta-se o conceito teórico das principais tecnologias facilitadoras necessárias para implantação da Indústria 4.0 para, dessa forma, possibilitar a criação de fábricas inteligentes.

a) Sistemas Ciber Físicos ou *Cyber Physical Systems* (CPS)

São sistemas tecnológicos que integram o ciberespaço com processos e objetos físicos para transformar máquinas e dispositivos de linhas de produção e células em uma rede, de tal maneira que dados em tempo real estejam disponíveis para a tomada de decisão, como a priorização de ordens de produção, otimização de tarefas, requisitos de manutenção, entre outros. Sensores inteligentes e atuadores são empregados para coletar e distribuir esses dados nas redes virtuais e em tempo real (Jabbour *et al.*, 2018).

A transformação das fábricas dos dias de hoje para fábricas inteligentes e com organização própria necessita de adequações severas nas bases de produção e logística, em especial nos CPS, sendo a tecnologia mais solidificada para aplicações na fábrica e a condição para obter sistemas automatizados e inteligentes. Suportarão as aplicações das tecnologias, a integração entre as máquinas, a IA, os sistemas de operações on-line e os de aprendizagem adaptativa (Santos, 2018).

A fusão do mundo físico e virtual possibilitada pelo CPS, que são integrações de computação e processos físicos é um componente importante da Indústria 4.0. Computadores e redes incorporados monitoram e controlam os processos físicos, com *feedback*, onde os cálculos afetam os processos físicos e vice-versa. Três (3) fases caracterizam o desenvolvimento do CPS. A primeira geração do CPS inclui tecnologias de identificação como etiquetas com identificação por radiofrequência (RFID), que permitem uma identificação única. O armazenamento e a análise devem ser fornecidos como um serviço centralizado. Na segunda geração do CPS, sensores e atuadores com uma gama limitada de funções tornam-se presentes. Na terceira geração, os sensores e atuadores podem analisar e armazenar dados (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

Para fazer plena utilização desses sensores, a disponibilidade eficiente em redes com RFID será um pré-requisito nas fábricas. A utilização de sensores em fábricas inteligentes será a fonte de informação para o sistema de controle e dispositivos técnicos, possibilitando a medição de grandezas físicas e técnicas e a

conversão em um sinal que será transmitido remotamente e, posteriormente, processado. São inúmeros sensores, câmeras e microfones do sistema de posicionamento global (GPS) que formarão o sistema nervoso digital. Esses dispositivos terão informações sobre várias grandezas, como tamanho, temperatura, carga, distância, velocidade, entre outros (Vrchota; Pech, 2019).

O potencial na economia e na sociedade dos CPS é maior do que foi notado e investimentos com grandes valores estão sendo feitos no mundo todo para disseminar e desenvolver essa tecnologia. Os desafios são consideráveis, uma vez que os componentes físicos desses sistemas incluem requisitos de segurança e confiabilidade com mais qualidade, bem diferentes dos de computação de uso geral. Os componentes físicos também possuem qualidades distintas dos componentes de software orientados a objetos. A fim de obter todo o potencial do CPS, é necessário reconstruir a utilização de computação e rede, uma vez que será fundamental unificar a dinâmica física com a computação (Lee, 2008).

No tocante aos recursos tecnológicos de máquinas e equipamentos, ferramentas e produtos, a prioridade é o desenvolvimento para a criação de CPS. A aquisição de dados ocorrerá por meio de sensores e atuadores. Serão criados melhorando os componentes mecatrônicos com outros, como sensores, atuadores e sistemas de processamento de informações, sempre com recursos de comunicação. A experiência indica que as empresas que tentam implementar o CPS têm uma tendência a construir controles locais, mas que não interagem com outros recursos ou simplesmente a usar etiquetas com códigos de barras ou RFID para fazer o inventário sem fazer a plena utilização do potencial de identificação automática (Schuh *et al.*, 2020).

A tecnologia RFID é usada para identificar vários objetos em diversos e diferentes locais. Os recursos serão controlados remotamente para melhorar os processos industriais. O monitoramento servirá para análise das atividades a fim de detectar possíveis falhas e realizar uma manutenção preventiva e também com a utilização da comunicação máquina a máquina ou *machine-to-machine* (M2M) (Vrchota; Pech, 2019).

A comunicação M2M é outro importante conceito relacionado com os CPS, são dispositivos inteligentes que se comunicarão por meio de uma rede. A M2M e a IoT

possibilitarão modelos de negócios inovadores e, junto com dados integrados, aumentarão a eficiência e a automação com sistemas de baixo custo no ambiente do *e-commerce*, e poderão oferecer serviços com inteligência aos consumidores. Com os CPS espera-se aumentar a segurança, a eficiência e a produtividade, com a conexão das tecnologias de produção, obtendo fluxos mais flexíveis de trabalho e com novas formas colaborativas (Gunes *et al.*, 2014).

b) Internet das Coisas (IoT)

A IoT é uma infraestrutura de TI que possibilita a coleta e transmissão de dados entre dispositivos, resultando em identificação, localização, rastreamento e monitoramento de objetos. Códigos de barras, sensores sem fio e Identificadores de RFID são exemplos de tecnologias que irão contribuir para o alcance cada vez maior da IoT (Jabbour *et al.*, 2018).

A IoT permite que a RFID, sensores, atuadores e telefones celulares tenham uma interação e uma cooperação com seus componentes inteligentes vizinhos, a fim de alcançar os objetivos comuns. A integração da IoT no processo de manufatura é um facilitador-chave para a Indústria 4.0 (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

Os CPS combinados proporcionam a estrutura inicial para a interligação entre os equipamentos e produtos pela Internet ou por redes próprias, possibilitando uma comunicação com seus fabricantes, com os consumidores e com as plataformas de serviços associados. Essa concepção é denominada Internet das Coisas e Serviços (IoTS – *Internet of things and services*). A IoTS ultrapassará as limitações das indústrias, será aplicada também nas cidades, nas edificações, nos transportes, nas redes de energia elétrica, nas empresas de serviços e nas áreas de saúde, na agricultura e nos serviços públicos. Essa disseminação será possível com a redução nos preços dos sensores, nos hardwares de processamento, armazenamento e transmissão de dados e dos dispositivos móveis inteligentes, que cada vez mais se tornarão presentes (Santos, 2018).

A IoT é uma vasta gama de sensores interconectados em máquinas, pessoas e produtos acoplados a controladores inteligentes. Um sensor detecta e/ou mede alguma propriedade do ambiente em que está implantado e traduz sua entrada em um sinal elétrico que pode ser processado por circuitos eletrônicos. O preço médio dos sensores vem reduzindo e a velocidade do *clock* do microprocessador aumentando.

Essa combinação de redução de custos e aumento da velocidade de processamento, juntamente com avanços nas tecnologias de medição e comunicação, possibilitaram a visão da IoT (Olsen; Tomlin, 2019).

Será mais uma tecnologia habilitadora, da mesma forma que os CPS, ela oferece suporte as aplicações de redes produtivas e em toda cadeia de valor. Tem a possibilidade de comunicar diferentes empresas, ou diferentes grupos de trabalho, que têm a possibilidade de trabalhar em paralelo a fim de solucionar o mesmo problema, pois é uma tecnologia transversal a diversos setores. Com isso, é também uma tecnologia que facilita as atividades de Engenharia simultânea, trazendo a possibilidade de uma interação das equipes de engenharia e projeto direta com os clientes, em plataformas de comunicação, ou até mesmo de softwares adicionados aos produtos. Dessa forma inteligente, os produtos com autonomia própria podem se comunicar com seus fabricantes e alertar sobre situações que aproximam as partes envolvidas na comercialização de produtos e serviços (Santos, 2018).

As *Smart Factories* da Indústria 4.0 irão criar a ideia da Industrialização Orientada para Exportação (IoE), conectando as pessoas, as coisas/objetos e os dados, com novas maneiras de organizar e conduzir processos industriais. Ao integrar as ideias da IoT e CPS em suas operações, as Fábricas Inteligentes estabelecem um elemento-chave para a Indústria 4.0. Essas organizações são definidas como fábricas que objetivam auxiliar pessoas e máquinas na execução das tarefas. Isso só será possível por meio de sistemas que são executados em segundo plano. Esses sistemas realizam suas tarefas com base em informações provenientes do mundo físico e virtual. As informações do mundo físico são as grandezas dos componentes e as informações do mundo virtual são, por exemplo, documentos eletrônicos, desenhos e modelos de simulação (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

c) Computação em nuvem

A computação em nuvem refere-se a uma rede virtual em que os fornecedores disponibilizam recursos de fabricação e os clientes podem acessar seus serviços, como design de produto, simulação e teste *on demand* (sob demanda). Os recursos de manufatura disponíveis tornam-se serviços que são exibidos em uma plataforma. O objetivo da manufatura em nuvem é compartilhar recursos e melhorar a prestação de serviços de manufatura (Jabbour *et al.*, 2018).

A computação em nuvem (*cloud computing*) é utilizada de forma ampla por pessoas e empresas em geral. Sua utilização foi possível devido à redução de custos, pela capacidade aumentada de armazenamento de dados e pelo desenvolvimento das ferramentas de transmissão de dados, com a evolução da infraestrutura para internet e redes. O modelo de computação em nuvem possibilita o acesso a redes com uma central de recursos, a utilização inteligente e eficiente dos recursos, menores esforços de gerenciamento de hardware e software, maiores capacidades de computação e serviços sob demanda, sem a interação humana e com provedores de serviços (Gunes *et al.*, 2014).

A computação em nuvem inclui uma série de recursos de TI que oferecem condições de armazenamento e processamento no sistema virtual atendendo a vários usuários. Possibilita vantagens ao paradigma de TIC, como auxiliar os sistemas a automatizarem e integrarem, além de facilitarem o gerenciamento e a administração. É a maneira de colocar on-line os recursos e serviços e combinar sistemas baseados na estrutura cliente/servidor. Existem três (3) modelos de computação em nuvem: (1) Software como Serviço onde o acesso depende da compra do cliente, como Planejamento de Recursos Empresariais ou *Enterprise Resource Planning* (ERP); (2) Plataforma como Serviço, onde os clientes podem acessar seus aplicativos na nuvem, como ofertas e desenvolvedores de software; e (3) Infraestrutura como Serviço onde ocorrem as atividades básicas, como armazenamento de recursos (Erboz, 2017).

A nuvem é um sistema de computação paralelo e sua distribuição é possível graças a uma coleção de computadores interconectados e virtualizados, que são entregues dinamicamente e apresentados como um ou mais recursos de computação unificados, com base em acordos de nível de serviço e negociados entre um provedor de serviços e os clientes. A nuvem é atualmente a solução de hardware e software do data center que fornece os serviços. Seus recursos são transformados dinamicamente para se adaptarem ao carregamento variável, permitindo a utilização ideal desses recursos. As nuvens são também serviços que oferecem capacidade de computação, rede e capacidade de armazenamento. São operadas com base em modelos de implantação: pública, privada, híbrida e comunitária. Estão também baseados na oferta de serviços ou programas armazenados em servidores e na Internet (Vrchota; Pech, 2019).

Uma tendência futura da computação em nuvem para as organizações industriais será a existência de inúmeras estações de trabalho sem unidades de processamento e armazenagem, uma vez que essas atividades poderão ser realizadas de forma centralizada na nuvem. Isso diminuirá a complexidade de equipamentos nas linhas de produção, tornando o fluxo de informações mais robusto e controlado, com menos espaço físico necessário, melhorando o *layout* e o fluxo de materiais (Santos, 2018).

d) Big Data

Para Rautenberg e Carmo (2019), *Big Data* é um termo derivado dos avanços recentes relativos à massificação da utilização de recursos tecnológicos e da farta produção de dados. Em suma, é um conceito que caracteriza volumosos conjuntos de dados heterogêneos, os quais não possibilitam processamento por soluções computacionais tradicionais, considerando seu tamanho, dinamismo e complexidade perante as novas exigências das demandas de informação da atual sociedade do conhecimento.

Santos (2018) ratifica que o *Big Data* é compreendido como uma base de dados inapropriada para ser usada com os métodos tradicionais de processamento de dados, devido a sua enorme abrangência, à estrutura complexa de organização desses dados e ao tamanho da base. Desta forma, técnicas e sistemas especiais, novas metodologias de análise, aquisição, preparação, pesquisa, compartilhamento, armazenagem, transferência, visualização e privacidade dos dados têm sido requeridas para a realização de análises preditivas. Poderão ser utilizadas pelas diversas áreas de negócios das empresas, para aumentar a produtividade, reduzir custos, obter manutenção preditiva, bem como captar e fidelizar clientes, entre outras aplicações industriais e de serviços.

O *Big Data* está ligado à infraestrutura do hardware e de serviços de computação na nuvem, necessários para o armazenamento, o processamento e a distribuição de recursos. Em outras palavras, considerando a evolução dados → informação → conhecimento, o conceito *Big Data* é relacionado à camada básica e fundamental de materiais, privilegiando os 6Vs atribuídos aos dados (Velocidade, Variedade, Variabilidade, Veracidade, Volume e Valor). Acredita-se que a Ciência da

Informação tenha papel fundamental na consolidação dos ecossistemas de *Big Data* (Rautenberg; Carmo, 2019).

Neste cenário, criar e desenvolver ferramentas para obter informações com o *Big Data* e da ciência de dados pode aumentar o conhecimento no Processo de Tomada de Decisão e com isso despertar a atenção das organizações. Técnicas de *Business Intelligence* (BI) têm evoluído rapidamente nos últimos anos, suportando cada vez mais e com maior eficiência o nível estratégico das organizações no processo de tomada de decisão. Santos (2018) destaca a integração de sistemas da Indústria 4.0, como:

- Integração de sistemas físicos básicos e sistemas informáticos por meio de RFID;
- Integração com outros setores econômicos possibilitando a integração com comércio, logística, serviços financeiros e outros fornecedores de serviços;
- Integração com outras indústrias e outros segmentos industriais aumentando a troca de informações e as trocas comerciais;
- Integração em redes dinâmicas de criação de valor considerando processos que adicionam valor ganha novos aspectos na Indústria 4.0 quando a produção é colocada em redes dinâmicas durante todo o ciclo de vida do produto.

e) Computação visual

A computação visual, ou computação gráfica, pode ajudar no atingimento da Indústria 4.0, na medida em que ela inclui a possibilidade e a condição de digitalização do físico, adicionando a simulação de sensores e atuadores com a interação do físico a partir do digital, com modelos em Realidade Virtual (VR – *Virtual Reality*) e Realidade Aumentada (AR - *Augmented Reality*), com visualização em tempo real, interação com modelos digitais, e por meio da impressão 3D. Essas tecnologias são exemplos de como a computação visual pode colaborar para atingir a reprodução e digitalização do mundo físico (Santos, 2018).

A VR é definida como um mundo tridimensional (3D) gerado por computador, em um ambiente que simula situações e contextos complexos da vida real e permite

que as pessoas tenham total interação entre si. A simulação implica exhibir ou modelar alguns recursos-chave e comportamento de alguns sistemas físicos ou abstratos a fim de realizar testes, ou para otimização ou para educação. Essas simulações de produtos e processos são muito utilizadas na produção, em especial nos processos de visualização, simulação, representação, interpretação e modelagem. Fortalecer as simulações digitais com dados de sensores aproxima da realidade e a precisão dos resultados da simulação ficará cada vez melhor (Vrchota; Pech, 2019).

A VR permite a inserção das pessoas em um meio virtual, proporcionado por simulações, testes e sensações, on-line e em tempo real, sem entrar em contato com nada do mundo físico. Por meio dos CPS possibilitará a realização de atividades remotas com uma conexão entre os elementos no mundo virtual, que pode ter estruturas, máquinas, pessoas e produtos. As aplicações para a digitalização da produção são inúmeras, podendo criar uma interação com ambientes de difícil acesso ou até mesmo em que a entrada ou permanência de pessoas seja inviável, também pode ser utilizada para testar produtos antes mesmo de serem produzidos. Uma característica-chave da VR é a interatividade em tempo real (Santos, 2018).

A visão é considerada para as pessoas como uma das entradas sensoriais mais importantes da vida. Reforça o jargão popular de que “uma imagem vale mais que mil palavras”, o *Visual Computing* refere-se a todas as tecnologias que processam ou geram conteúdo visual ou informação visual, em que se destacam as tecnologias de Realidade Virtual, Realidade Aumentada, Visão Computacional e Análise Visual (Segura *et al.*, 2018).

Por meio de câmeras, sensores e a sobreposição de elementos gráficos digitais, a AR reproduz os elementos do mundo virtual no mundo real. Possui inúmeras aplicações nas áreas de projetos, cujos objetos concebidos e projetados são inseridos nos ambientes reais. Possui aplicações também em processos em que, por meio de dispositivos móveis, usuários podem ter orientação das instruções em tempo real e verificação das atividades (Santos, 2018).

Os sistemas de VR em geral rastreiam o movimento de objetos portáteis e da cabeça e membros do usuário, os dados recebidos são usados para determinar a visão do usuário, navegação, interação com objetos e possível movimento do corpo virtual, conhecido como "avatar". As principais áreas de aplicação da VR estão na área

da saúde. A VR inclui um computador, um capacete de imagem, fones de ouvido e luvas sensoriais de movimento (Vrchota; Pech, 2019).

A VR e a AR são duas tecnologias que se complementam, estão dentro da computação gráfica e possuem características diferentes na execução, por conta disso, possuem diferenças em suas aplicações em produtos e processos. Possibilitam inúmeras aplicações, que podem aumentar a eficiência de processos, reduzir tempos de processos e desenvolvimento de produtos e, ainda na fase de projeto, prevenir falhas. São tecnologias com potenciais gigantescos de desenvolvimento e podem ser integradas entre si e com outras tecnologias, como a IA, para criarem interação entre o mundo virtual e o real (Santos, 2018).

Os sistemas que têm como base a AR podem dar suporte a uma variedade de serviços, desde selecionar peças em um armazém até enviar instruções de reparação por meio de dispositivos móveis. As informações de manutenção em campo podem ser simuladas nos *smartphones* ou *tablets*, diminuindo custos com deslocamentos, além de evitar interpretações equivocadas e, conseqüentemente, trabalhos reincidentes na manutenção. A tecnologia AR pode adicionar, ainda, novas relações homem-máquina para a produção de soluções e ativos de tecnologia, fornecendo *feedbacks* com indicadores de produtividade em tempo real sobre os processos produtivos, e com isso auxiliar para uma melhor tomada de decisão (Santos *et al.*, 2018).

Desta forma, a AR torna-se também uma tecnologia de habilitação-chave para o ambiente da Indústria 4.0, à medida que melhora a transferência de informações entre os mundos digital e físico e auxilia na cooperação entre seres humanos e máquinas (Santos *et al.*, 2018).

f) Dispositivos e aplicações móveis

Equipamentos e aplicações para eletrônicos, como *smartphones*, sistemas de navegação, *Bluetooth*, redes *wireless*, sistemas RFID estão na utilização diária das pessoas e isso irá mudar o modo tradicional de trabalhar e também os conceitos de comunicação na indústria. Mas essas tecnologias ainda não estão amplamente difundidas no mundo fabril, o que sinaliza um enorme potencial de aumento da comunicação empresarial (Santos, 2018).

Atualmente o desenvolvimento de aplicativos para equipamentos móveis é bastante demorado e com preços elevados, isso se deve à fragmentação do mercado

de sistemas operacionais móveis. Não há padrões de desenvolvimento, uma vez que cada plataforma possui seus próprios ambientes, com linguagens e modelos de programação próprios. Recentemente várias ferramentas de desenvolvimento com plataformas de compilador cruzado foram estabelecidas para facilitar o desenvolvimento de aplicativos híbridos, baseados na web e para todas as plataformas (Gorecky *et al.*, 2014).

Os dispositivos móveis (*mobile devices*) são exemplos desses equipamentos, como *tablets*, *palm tops*, *smartphones* e também dispositivos acoplados ao corpo (*wearables technologies*), como óculos, braceletes, relógios, luvas, calçados e demais vestimentas que permitirão a interação entre homens e máquinas em tempo real. Esses dispositivos, dotados de softwares embarcados e com o auxílio de câmeras, *scanners*, sensores, conexões com a internet, sistemas de posicionamento GPS, transmissões RFID, entre outras tecnologias, podem trazer velocidade de comunicação e aumento de produtividade na realização de atividades no ambiente de produção das fábricas. As aplicações possíveis poderão ser diversas, pois a interação das empresas com os consumidores poderá gerar novas vendas e fidelizar os clientes, por meio de serviços de apoio e assistência técnica dinâmicos e adequados para cada perfil de consumidor. Também são diversas as oportunidades de novos negócios, a partir da união dessas tecnologias, principalmente agregando-se serviços aos equipamentos (Santos, 2018).

g) Equipamentos autônomos e Inteligência Artificial (IA)

Em aplicações industriais, equipamentos autônomos de movimentação de materiais e de processos de fabricação já são utilizados em processos fabris e com sistemas de armazenagem, mas não estão ainda amplamente difundidos. Com o suporte das tecnologias de IA e por sistemas de aprendizagem de máquinas (*machine learning*), esses equipamentos autônomos tenderão e poderão alterar profundamente a organização do trabalho das empresas no futuro (Santos, 2018).

Por meio da combinação da computação em nuvem com a intralogística em sistemas produtivos, os sistemas inteligentes de manuseio de materiais autônomos podem afetar a flexibilidade e a produtividade dos processos produtivos em configurações específicas com robôs móveis autônomos (AMR). No novo *layout* desses sistemas no contexto da Indústria 4.0, é importante e crucial a utilização dos

AMR. Os processos e equipamentos tradicionais tornam o sistema produtivo de certa forma estático e com barreiras para realizar mudanças em seu desenho e na rota dos processos. O uso de tecnologias com IA para posicionamento e navegação pode melhorar o transporte de sistemas produtivos com a utilização de veículos inteligentes, como o AMR, para atingir soluções de viabilidade, aumentando a flexibilidade produtiva dos sistemas fabris (Fragapane *et al.*, 2022).

Estações de trabalho completamente automatizadas, veículos sem condutores e fábricas trabalhando de forma intermitente vão conferir uma nova realidade e novos padrões de competitividade industrial e poderão alterar a competitividade das cadeias de abastecimento globais. Essa é a expectativa dos países e das empresas de alta tecnologia que investem em tecnologia e inovação, por possuírem instalações em países com alto custo de mão de obra. Setores que tradicionalmente são classificados como de mão de obra intensiva serão transformados em capital intensivo, o que poderá mudar a competitividade das organizações (Santos, 2018).

h) Manufatura Aditiva (AM – *Additive Manufacturing*)

A AM foi inserida como uma tecnologia que traria enormes transformações e consequências na gestão das operações considerando seus objetivos principais de qualidade, flexibilidade, velocidade e custo. AM, conhecida também como impressão tridimensional (3D), é um processo que, a partir de uma representação 3D digital, produz a junção de camadas à medida que avança nesse processo. O modelo digital 3D inicial é convertido em um formato de arquivo digital com extensão “stl”. Essas camadas digitais formam as instruções para a “máquina” de AM para produzir o objeto camada por camada. Muitas vezes é necessário um processo de acabamento após a impressão (Olsen; Tomlin, 2020).

AM é a manufatura de componentes do produto sem a necessidade de ferramentas especializadas e recursos de construção, representa a prototipagem flexível e conectada com componentes de produtos em grande escala, facilitando a customização. As impressoras 3D são os principais recursos atualmente associados à AM (Jabbour *et al.*, 2018).

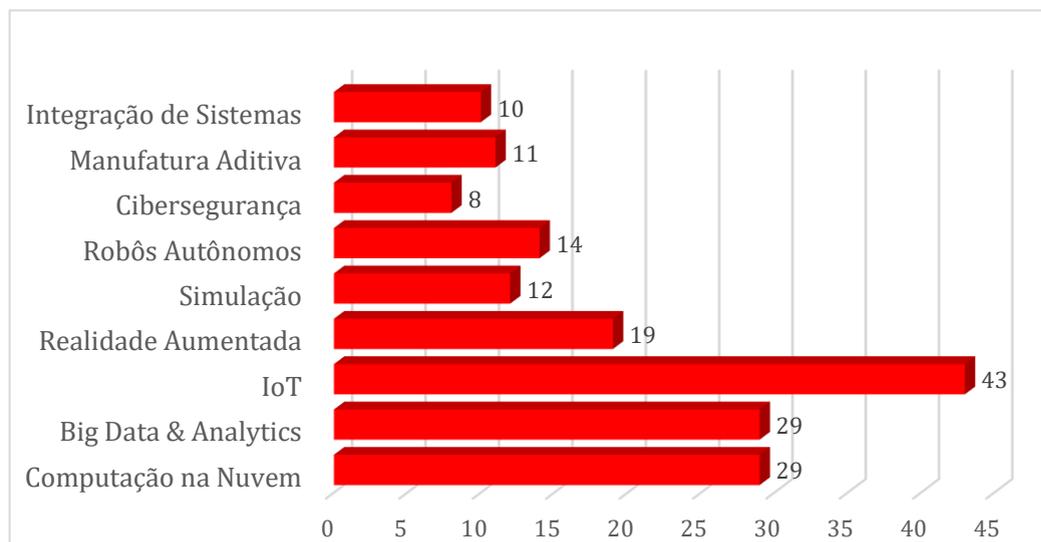
As indústrias têm percebido grande impacto com a tecnologia de impressão 3D. Também chamada de AM, ela elimina desvantagens de se conceber produtos individuais customizados, o que pode proporcionar uma vantagem significativa no

mercado com impacto na eficiência. Na prototipagem rápida juntamente com o processo de produção descentralizado gerado pela impressão 3D, um modelo de desenho poderá ser impresso em qualquer local a partir do envio de um arquivo digital pela rede, eliminando passos intermediários de manufatura como transporte e armazenamento, com isso, elevando os níveis de eficiência dentro de uma organização (Venancio; Brezinski, 2017).

Segundo Santos (2018), é um recurso técnico de fabricação por meio da inserção de materiais em camadas aglomeradas para formar um objeto. A AM contribui significativamente para aumentar a flexibilidade da indústria, proporcionando novas soluções de produção com produtos mais complexos e flexíveis a um custo menor, também formando uma cadeia de fornecimento atualizada, com diminuição de estoques e menores prazos de entrega.

Para aplicações na indústria, a modelagem e a impressão 3D podem proporcionar uma versatilidade e flexibilidade na geração de protótipo, moldes, e modelos de produtos inovadores, além da possibilidade de fabricação de produtos com as técnicas de subtração. Os benefícios podem ser inúmeros, como a diminuição de *lead time* do lançamento de produtos, rápida prototipagem, diminuição de custos e inovação (Santos, 2018).

Figura 1 - Tecnologias mais citadas



Fonte: (Teng, 2021, p. 58).

Teng (2021) realizou um estudo quantificando e considerando a incidência dessas tecnologias para a implantação da Indústria 4.0, fez um levantamento em sua pesquisa com 55 artigos via base Scopus, obtendo resultados que evidenciaram a predominância da tecnologia IoT, seguida por *Big Data and Analytics* e Computação na Nuvem, que apresentaram contagens consideravelmente maiores em relação às outras tecnologias apresentadas, conforme Figura 1.

2.1.2 Indústria 4.0 nas empresas

Embora as tecnologias da Quarta Revolução Industrial ofereçam muitas vantagens perceptíveis para o setor manufatureiro, a maioria dessas tecnologias é desenvolvida somente para ou por grandes corporações. Fica, assim, fora das condições e das necessidades das PME's, apesar da grande representatividade destas no Brasil e em outros países. Os benefícios alcançados com a implantação das tecnologias da Indústria 4.0 são enormes com relação à redução de custos, flexibilidade, qualidade, eficiência e outras vantagens competitivas. Por esses e outros motivos as PME's também podem desejar adotar essas tecnologias de IoT, CPS, *Big Data* e todas as demais que compõem a Indústria 4.0, mas a falta de conhecimento e de recursos financeiros tornam-se as principais barreiras e desafios dessas empresas (Masood; Sonntag, 2020).

Há diferentes critérios para classificar as empresas.

Uma forma é pela Receita Operacional Bruta (ROB), na qual a pequena empresa tem renda anual maior que R\$ 360 mil e menor ou igual a R\$ 4,8 milhões, e a média tem renda anual maior de R\$ 4,8 milhões e menor ou igual a R\$ 300 milhões. Essa forma é definida pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Outra forma é pela quantidade de funcionários, na qual, na indústria, as micro e pequenas empresas possuem até 99 colaboradores, e as médias de 100 até 499 empregados; no comércio e varejo, as micro e pequenas empresas possuem até 49 colaboradores, e as médias de 50 a 99 funcionários. Essa forma definida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Segundo dados do SEBRAE (2021), os pequenos negócios respondem por mais de um quarto do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. As quase 9 milhões de micro e pequenas empresas no país representam 27% do PIB, um resultado que vem aumentando nos últimos anos e é fundamental que cresça não somente a quantidade de empresas, mas também a participação dessas na economia do Brasil, afirma o presidente do SEBRAE, Luiz Barretto.

A produção que foi gerada pelas micro e pequenas empresas cresceu consideravelmente, uma vez que mais que quadruplicou em dez anos, de R\$ 144 bilhões em 2001 para R\$ 599 bilhões em 2011, em valores da época. As micro e pequenas empresas são as principais geradoras de riqueza no Comércio no Brasil, já que respondem por 53,4% do PIB desse setor. No PIB da Indústria, a participação das micro e pequenas (22,5%) já se aproxima das médias empresas (24,5%). No setor de Serviços, mais de um terço da produção nacional (36,3%) tem origem nos pequenos negócios (SEBRAE, 2021). São exemplos de Pequenas e Médias Empresas as padarias, minimercados, farmácias, lanchonetes, escritórios, consultórios, salões de estética, entre outros. São modelos de negócios encontrados em qualquer parte do país, oferecendo os mais variados tipos de serviço.

A pesquisa realizada pelo SEBRAE (2014) mostrou que é fundamental e relevante o papel socioeconômico executado pelas PME's no Brasil. As PME's são representadas por 98,5% das empresas no Brasil e por mais de 90% no mundo. Essas

empresas exercem um papel fundamental na criação de novas oportunidades econômicas, além de auxiliarem na mobilidade social.

As PME's têm a oportunidade no futuro de aumentar sua competitividade com a utilização das tecnologias da Indústria 4.0, desde que, para isso, essas novas tecnologias se tornem mais acessíveis e possa ser vantajoso para essas empresas investir nos recursos da Quarta Revolução Industrial e obter vantagens financeiras e retorno sobre o investimento. Ainda assim, mantém-se o paradigma se as PME's serão capazes de implementar essas modernas tecnologias de forma rápida e realizar de forma vantajosa a migração para essa transformação digital. Essas empresas apresentam um nível menor de implementação da Indústria 4.0, quando comparado com as grandes corporações, o que ratifica que as grandes empresas possuem oportunidades maiores para implantar e utilizar novas tecnologias e transformá-las em fábricas inteligentes (Pech; Vrchota, 2020).

De acordo com Santos *et al.* (2018), na União Europeia, cerca de 20% de todos os empregos das empresas referem-se às atividades manufatureiras e a maioria desses postos é oferecida pelas PME's. Portanto, nesse cenário, há uma identificação da importância de possibilitar a transição dessas empresas para a Quarta Revolução Industrial e assim integrar digitalmente as cadeias de valor e promover a utilização de serviços especializados a fim de aumentar a coleta de dados para monitorização da fábrica (European Commission, 2016).

O objetivo da utilização de tecnologias digitais pelas PME's é possibilitar diminuir os custos, melhorar a qualidade dos produtos e/ou serviços, maior eficiência no gerenciamento das operações por conta da monitoria das atividades produtivas e melhorar sua competitividade no mercado de trabalho. Para tanto, é fundamental que as PME's tenham a sensibilidade de visualizar a oferta de oportunidades com a Quarta Revolução Industrial e a condição de se inserir em ambientes complexos e competitivos além de alcançar outras fronteiras por conta dessas tecnologias avançadas (Jamwal *et al.*, 2021).

Em um estudo comparativo, numa escala de 0 a 5, a média das empresas brasileiras e das alemãs estão no mesmo nível de maturidade para a implantação da Indústria 4.0 com valor próximo a 1,0. Embora 5,6% das empresas da Alemanha ocupem as posições mais elevadas com valores de 3 a 5, o Brasil não possui nenhuma

empresa pesquisada nesse patamar. Verifica-se que há organizações com a implementação da Quarta Revolução Industrial em estágio bastante avançado, com destaque para aquelas com atividades de manufatura. Principalmente as PME's, inclusive na Alemanha, preferem aguardar inicialmente para posteriormente decidir com relação a ações que deverão tomar no tocante à Indústria 4.0. No Brasil, a grande expectativa por parte das indústrias está relacionada à automação dos processos produtivos a fim de aumentar a produção e assim melhorar sua posição inferior em 3 vezes que a da alemã no *ranking* de produtividade (Moura; Kohl, 2020).

As empresas brasileiras têm um enorme desafio e uma necessidade de maiores investimentos em tecnologia e inovação. Entretanto, na dimensão Colaboradores, as empresas brasileiras mostram um nível maior do que a dos alemães. A Indústria 4.0 necessita de profissionais com capacidade de utilizarem novas tecnologias avançadas. Um novo perfil de empreendedor será exigido neste novo momento tecnológico, com abertura para relacionamentos e com a capacidade de acompanhar as mudanças e de alinhar a estratégia organizacional com as decisões de investir na implantação da Indústria 4.0 (Moura; Kohl, 2020).

Inicialmente, as tecnologias da Indústria 4.0 estavam disponíveis apenas para grandes corporações, por conta dos altos investimentos (Pech; Vrchota, 2020). Porém, as PME's são as que mais geram empregos no Brasil. Essas empresas estão começando a introduzir tecnologias modernas na produção. Por conta disso, é necessário mapear a situação e o grau de implantação da Indústria 4.0 para que estas possam ter uma visão mais próxima da sua posição no mercado.

É necessário também avaliar melhor os passos futuros na implementação da Indústria 4.0, para que essas empresas não enfrentem dificuldades de implementação desnecessárias, como: estreito portfólio de produtos, que não garante a plena utilização da eficiência dos sistemas de produção automatizados e autônomos; custo de obtenção de dinheiro; turbulência do ambiente do aspecto micro e macro; falta de conhecimento sobre a Indústria 4.0; maior foco nas operações às custas do desenvolvimento da empresa; falta de compreensão da importância estratégica da Indústria 4.0; poucos recursos humanos; necessidade de educação continuada dos funcionários; e falta de padrões.

Há uma lacuna de pesquisa entre Indústria 4.0 e PME's. As PME's desejam adotar essas novas tecnologias, no entanto, as barreiras financeiras e de conhecimento persistem como os maiores problemas e desafios. O desenvolvimento de PME's com tecnologias da Indústria 4.0 é claramente crítico para as empresas competirem entre si dentro de um mercado globalizado. As tecnologias da Indústria 4.0 são claramente uma mudança radical em relação aos sistemas industriais das últimas décadas. No entanto, com futuras soluções de tecnologia com base no *feedback* industrial direto e no financiamento necessário, as PME's têm potencial para serem bem-sucedidas e aliviadas (Masood; Sonntag, 2020).

Por meio de uma estratégia multifacetada, as PME's podem conseguir superar as dificuldades com investimentos em desenvolvimento, na aquisição de tecnologia e na contratação de especialistas em TI, seguindo, assim, os exemplos das corporações maiores nas formas de trabalho. Podem também alcançar a integração das suas cadeias de suprimentos, aproveitando-se do *Know How* adquirido ou focar na produção móvel e descentralizada com o uso de impressões 3D. Com isso, essa inovação possibilitará aos parceiros o desenvolvimento comum de projetos baseados nas plataformas *Open Source*, diminuindo o tempo em que são colocados no mercado os produtos e os riscos minimizados (Santos *et al.*, 2018).

Gráfico 1 - Relevância da Indústria 4.0 nas organizações



Fonte: Cunha (2018, p. 64).

O Gráfico 1 identifica quais desafios as PME's enfrentam com a Indústria 4.0. Os respondentes acham que o maior desafio é o custo e o esforço de implementação, totalizando 36% das respostas; outro grande desafio, segundo os respondentes, é achar profissionais interdisciplinares, com 27% das respostas. Logo em seguida, 'Demandas de clientes altamente individuais' totaliza 19% das respostas; 'Baixa padronização' aparece como 14% das respostas como desafio para uma PME com relação à Indústria 4.0. Por fim, a opção 'Outros' ficou com 4% das respostas. Dentre as respostas de outros desafios, os respondentes elencaram: quebra de paradigma, mudança cultural, gestão da mudança, grandes players concorrentes, falta de treinamento/capacitação dos profissionais nas empresas e poucas soluções/serviços concretos (Cunha, 2018). A dificuldade e a menor capacidade de absorção das novas tecnologias pelas PME's poderão estar relacionadas à limitação de seus recursos.

Para inserir essas empresas na Quarta Revolução Industrial, o governo brasileiro buscou realizar ações específicas e, em 2020, um grupo de 130 PME's manufatureiras foi pioneiro na abordagem proposta de desenvolvimento pelo Fórum Econômico Mundial, pelo Estado de São Paulo e pelo Ministério da Economia. O objetivo foi atingir duas mil empresas até 2021, com ações do Programa "Brasil Mais Produtivo", da Secretaria Especial de Produtividade e Competitividade (Brasil, 2019).

Aparentemente, verificou-se um esforço do governo brasileiro para viabilizar possibilidades para implantar a Indústria 4.0 nas PME's. O secretário Carlos da Costa afirmou que o trabalho com o Fórum Econômico Mundial foi imprescindível para alcançar os objetivos de disponibilizar a Quarta Revolução Industrial para as PME's no Brasil, o que poderá causar aumento significativo na produção, na habilitação da força de trabalho e na disposição das PME's do Brasil de investir em tecnologias emergentes.

2.2 Modelos de maturidade e prontidão tecnológica para a Indústria 4.0

A fim de avaliar os modelos de maturidade e os de prontidão tecnológica das empresas de manufatura com relação à Indústria 4.0, foi feita uma busca via base *Web Of Science*, no dia 29 de junho de 2022. Foram utilizadas as palavras-chave *readiness AND (model OR maturity OR assessment) AND "Industry 4.0"*. Essa busca

resultou em 217 trabalhos, limitou-se, em seguida, em relação aos tipos de documento: somente a artigos e artigos de revisão, refinando a pesquisa em 160 resultados. Em uma segunda pesquisa, limitando-a e direcionando-a, incluiu-se *AND "Supply Chain"* e obteve-se o resultado de 29 artigos.

A seguir apresentam-se os modelos entre as pesquisas realizadas para adequar e desenvolver um modelo a ser aplicado na amostra da pesquisa, a fim de verificar a prontidão tecnológica e a maturidade das empresas de manufatura no contexto da Indústria 4.0.

2.2.1 Industry 4.0 maturity and readiness models: a systematic literature review and future framework

Autor: Hajoary, P. K. (2020)

O objetivo do autor foi fornecer uma revisão crítica da literatura existente sobre dimensões, métodos, níveis e tendências atuais para avaliar os modelos de maturidade e prontidão da Indústria 4.0. Segundo o autor, é necessário que as empresas façam uma avaliação de como estão seus sistemas e processos atualmente para depois buscar um nível mais avançado de automação para a Quarta Revolução Industrial, uma vez que até então não havia essa revisão sistemática da literatura sobre a identificação das principais dimensões, níveis, métodos para avaliar o nível de maturidade e da prontidão tecnológica para a Indústria 4.0.

Na busca por uma solução dessa lacuna, Hajoary (2020) utilizou uma metodologia de Itens de Relatório Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Meta-Análise (PRISMA - *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*) para analisar a literatura existente e criar uma estrutura para indústrias e pesquisadores sobre o modelo de avaliação de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0. Um total de 53 artigos foram considerados relevantes para a análise temática. Encontrou 10 dimensões durante a revisão de literatura utilizadas por pesquisadores e profissionais: Estratégia e Organização; Pessoas; Processos; Tecnologia; Clientes; Manufatura e Operações; Produtos, Serviços; TI; e Cultura.

Dessa revisão, 60% dos artigos são conceituais, 31% são estudos de caso, 7% baseados em pesquisas e 2% estudos de pesquisa bibliográfica.

Verificou a variação dos níveis de maturidade de modelo para modelo, e constatou que a Alemanha lidera com o maior número de publicações nos modelos de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0 em termos de quantidade de publicações.

Seu trabalho buscou contribuir das seguintes formas:

- (a) Fornecer uma revisão holística dos modelos da Indústria 4.0 de maturidade e prontidão existentes;
- (b) Identificar as dimensões mais importantes, níveis de avaliação, métodos, campo de estudo, contribuições e limitações dos modelos de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0 existentes e adotados por pesquisadores e empresas de consultoria;
- (c) Analisar de forma comparativa os modelos de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0 existentes em três (3) áreas: propósitos descritivos, prescritivos e comparativos;
- (d) Fornecer tendências atuais no país de origem e frequência de publicações;
- (e) Fornecer uma estrutura abrangente de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0 com as dimensões identificadas para uma implantação futura.

O autor apresentou também uma variação dos níveis de maturidade em função das áreas de foco e de seus propósitos. De forma escalar e crescente, os modelos de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0 foram estruturados, para cada dimensão, em cinco (5) níveis ou estágios: nível 1 como ausência, nível 2 como iniciante ou existente, nível 3 como intermediário, nível 4 como experiência e nível 5 como especialista ou de alto desempenho.

A partir dessa literatura, propôs uma estrutura conceitual para avaliar os níveis de maturidade e prontidão da Indústria 4.0 de uma organização com 10 dimensões principais. Seu estudo contribuiu consideravelmente com uma teoria para o desenvolvimento de modelos de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0, tendo sido o primeiro artigo de revisão sobre as dimensões dos modelos de maturidade e prontidão da Indústria 4.0.

Com a metodologia PRISMA bem estruturada e replicável, a revisão das literaturas anteriores foi atualizada e ampliada, dando mais impulso às dimensões, métodos de avaliação, níveis, definições, país de origem, publicações acadêmicas, empresas de consultoria, entre outras lacunas.

2.2.2 A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management

Autores: Caiado, R. G. G.; Scavarda, L. F.; Gavião, L. O.; Ivson, P.; Nascimento, D. L. M.; Garza-Reyes, J. A. (2021)

Os autores construíram um modelo de maturidade a partir de elementos como: número de níveis, de dimensões e de perspectivas, além de um descritor para cada elemento. Foi definido um conjunto de indicadores da Indústria 4.0 para avaliar as perspectivas das operações e gerenciamento da cadeia de suprimentos, bem como a combinação de tecnologias e práticas gerenciais que melhor representam cada nível de um modelo de maturidade conceitual.

Os dados coletados a partir de comparações de modelos de maturidade para a Indústria 4.0 foram reavaliados e aprimorados por meio de entrevistas e foram propostas as dimensões com níveis e categorias. Posteriormente, definiram-se seis (6) grupos para desenvolver perspectivas, discutir as categorias, descrever indicadores e o modelo conceitual. As categorias detalhadas descrevem questões relevantes para as perspectivas do Gerenciamento das Operações da Cadeia de Suprimentos. Para medir a maturidade para a Indústria 4.0 de forma adequada, um dos participantes afirmou que seria mais viável avaliar a manufatura em termos de operacionalidade.

Embora alguns especialistas afirmem que quatro (4) níveis de maturidade seriam suficientes e adequados, por trazer maior diferenciação entre os níveis, para ajudar as empresas a avaliarem a maturidade de suas operações nas cadeias de suprimentos, os autores em um consenso entenderam que seria mais apropriado utilizar como referência o número de níveis de algum modelo já conhecido. Dessa forma, alguns envolvidos sugeriram seguir a Integração do Modelo de Maturidade de

Capacidade (CMMI - *Capability Maturity Model Integration*), que é composto por cinco (5) níveis e foi utilizado como referência para diversos outros modelos da literatura. No entanto, esse modelo partiu do nível 1 e o objetivo deles era de uma proposta de um modelo que evoluísse e partisse do nível da inexistência de tecnologias digitais, ou seja, nível 0.

Definiram os seguintes nomes para os resultados dos níveis de maturidade: inexistente, conceitual, gerenciado, avançado e auto-otimizado. Os resultados da avaliação de maturidade podem ser considerados de fácil interpretação, tornando-se um artefato de simples utilização. Os níveis de maturidade representam o estado atual da maturidade para a Indústria 4.0, medindo as Operações e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (OSCM - *Operations and Supply Chain Management*). Com isso, esses níveis se mostraram suficientes para uma descrição, além de proporcionar uma avaliação orientada para os objetivos e indicar potenciais de melhoria.

Para avaliar as dimensões essenciais da maturidade para a Indústria 4.0, notou-se que pessoas, processos e tecnologias eram fatores-chave na manufatura. Mesmo havendo várias outras dimensões como cliente, organização, integração, produtos e serviços, monitoramento e controle, estratégia, canais, parceiros-chave, logística, qualidade, manutenção, gestão de ativos, projeto e engenharia.

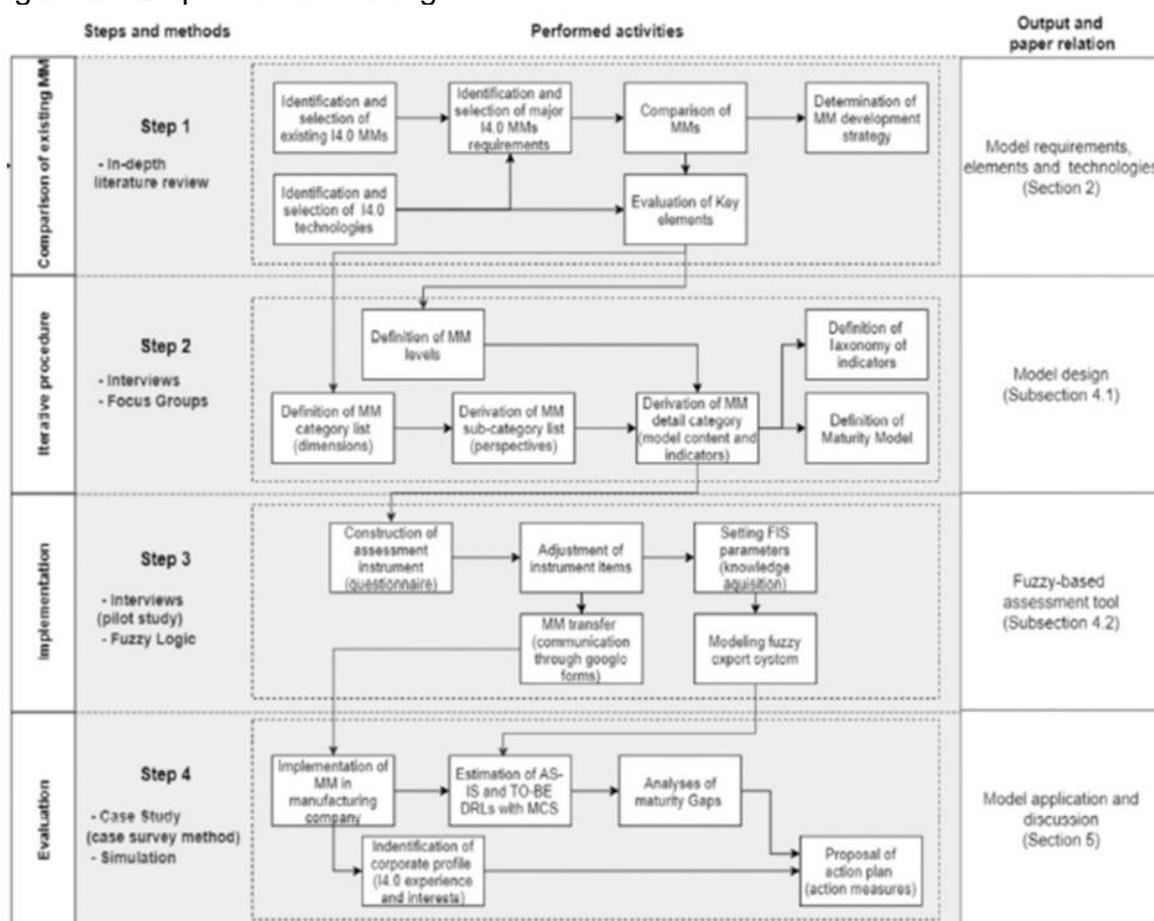
Apontaram como dimensões principais para avaliar a evolução das cadeias de suprimentos e operações: O SCM, o Gerenciamento de Produção e Operação (POM - *Production and Operation Management*) e as tecnologias. Alguns participantes apontaram que as habilidades e a gestão do conhecimento são também atributos críticos. Porém, os participantes nesse estudo chegaram a um consenso de que tecnologias e processos, assim como metodologias e boas práticas gerenciais, devem ser avaliados transversalmente nas três (3) grandes dimensões das Operações e do Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos.

Segundo especialistas, a dimensão SCM & POM (comum) mostra uma visão mais ampla das operações externas e internas e, para medir OSCM, as empresas devem considerar as perspectivas: Cliente, Logística, Fornecedor, Integração, Produção, Planejamento e Controle, Qualidade e Manutenção (Caiado *et al.*, 2021).

O modelo de maturidade proposto foi construído seguindo quatro (4) etapas, conforme exibido na Figura 2.

- (i) comparação de outros modelos para a Indústria 4.0 já criados, com o objetivo de identificar os elementos principais de um modelo de maturidade e as tecnologias da Indústria 4.0;
- (ii) levantamento e avaliação realizados repetidamente com o objetivo de desenhar o modelo de maturidade e determinar os indicadores críticos para avaliar as OSCM de forma sistemática;
- (iii) implementação do modelo, que consistiu no desenvolvimento e avaliação deste, buscando-se aperfeiçoar por meio de ajustes da ferramenta de avaliação e da modelagem de um conjunto de sistemas inferenciais;
- (iv) avaliação do modelo de maturidade, com um estudo de caso em uma empresa de manufatura, e os resultados foram avaliados com a análise do *gap* de maturidade e a proposta de ações para melhoria contínua da manufatura 4.0 na organização.

Figura 2 - Etapas da metodologia



Fonte: Caiado *et al.* (2021, p. 5, adaptado de Becker *et al.*, 2009).

A ferramenta final de avaliação do modelo de Caiado *et al.* (2021) foi derivada com o desenvolvimento de indicadores que demonstram o nível atual e desejado em uma área específica para servir como diretriz para a melhoria contínua do OSCM em relação à Indústria 4.0. O modelo final ficou composto por cinco (5) níveis de maturidade e três (3) dimensões dentro de sete (7) perspectivas que combinam características tecnológicas e metodológicas, fornecendo informações de avaliação mais detalhadas e um conjunto de indicadores, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Modelo de maturidade da Indústria 4.0 para operações e SCM

Dimensões	Perspectivas	Níveis de maturidade
SCM	Cliente	0 – Inexistente 1 – Conceitual 2 – Gerenciado 3 – Avançado 4 – Auto-otimizado
	Logística	
Fornecedor		
COMUM	Integração	
POM	PPC	
	Qualidade	
	Manutenção	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024), baseado em Caiado *et al.* (2021, p. 10).

Portanto, os métodos qualitativos teóricos e empíricos mostraram que uma visão multiperspectiva permite uma avaliação holística da maturidade para a Indústria 4.0 das operações e da cadeia de suprimentos.

Construíram um Modelo de Maturidade a partir de repetições, incluindo elementos como: número de níveis, de dimensões e de perspectivas; além de um descritor para cada elemento. Foi definido um conjunto de indicadores da Indústria 4.0 para avaliar as perspectivas das operações e gerenciamento da cadeia de suprimentos, bem como a combinação de tecnologias e práticas gerenciais que melhor representam cada nível de um modelo de maturidade conceitual.

2.2.3 Readiness of enterprises in Czech Republic to implement Industry 4.0: Index of Industry 4.0

Autores: Vrchota, J.; Pech, M. (2019)

O objetivo dos autores foi caracterizar a prontidão da empresa para usar a Indústria 4.0. Nesse estudo, aplicou-se um questionário para uma amostra de 276 organizações, principalmente da indústria de transformação. Utilizando análise fatorial exploratória, o índice da Indústria 4.0 (VPi4) foi desenvolvido para determinar o nível de implementação da Indústria 4.0 nas empresas. Os resultados foram posteriormente verificados por meio de análise estatística, utilizando-se o teste de Mann-Whitney e coeficientes de correlação.

Analysaram a prontidão das empresas para implantar a Indústria 4.0 no período de 2018/2019, sendo o trabalho dividido em duas ondas, como os próprios autores descreveram. Na primeira onda o objetivo foi compilar um índice de avaliação do nível da Indústria 4.0 nas empresas, tendo por base os resultados da pesquisa, o índice Indústria 4.0 (VPi4). Na segunda onda o objetivo foi a verificação estatística da consistência desse índice com os resultados posteriores do questionário.

As características das amostras de pesquisa de acordo com as ondas de pesquisa foram as seguintes:

- Primeira onda de pesquisa (ano 2018) —164 empresas (60% da amostra de dados);
- Segunda onda de pesquisa (ano de 2019) – 112 empresas (40% da amostra de dados).

Na primeira onda, para criar e definir o VPi4, utilizaram uma análise fatorial exploratória e a pesquisa foi aplicada em fevereiro-março de 2018 na República Tcheca.

Os autores classificaram as empresas da amostra em termos do tamanho e de sua intensidade tecnológica. O tamanho foi definido pelo número de trabalhadores, classificando-as em pequenas, médias e grandes empresas. A intensidade tecnológica foi definida com as empresas de maior intensidade tecnológica (HTI) e as

empresas de menor intensidade tecnológica (LTI) de acordo com a metodologia do *Czech Statistical Office High-Tech Sektor*.

- HTI: Engenharia e produção eletrotécnica (grupos CZ-NACE 24–30), produção química, de papel e não metálica (Grupos CZ-NACE 17–23).
- LTI: Produção de produtos para uso doméstico (Grupos CZ-NACE 13–16, 31–32), indústria de produção de alimentos (Grupos CZ-NACE 10–12).

O questionário focou os principais grupos de características da Indústria 4.0. Os itens do questionário foram definidos com o apoio de 34 gestores e sua avaliação de especialistas no âmbito da pesquisa qualitativa. A parte principal do questionário foi composta por 17 variáveis que caracterizam diferentes tecnologias da Indústria 4.0 utilizadas pelas empresas (coleta de dados, armazenamento em nuvem, análise de dados, capacidade de pessoas, infraestrutura de TI, sistemas de informação, M2M, robôs, terminais móveis, utilização de sensores, software de aprendizagem, compartilhamento de dados, realidade virtual, manufatura aditiva, ou seja, impressão 3D, nanotecnologia, drones e veículos autônomos). Essas tecnologias estão descritas no item 2.2 deste trabalho. O questionário foi composto por 17 variáveis que caracterizam diferentes tecnologias da Indústria 4.0.

Na segunda onda, 112 empresas (40%) em quatro (4) características de identificação também foram medidas: Tamanho de acordo com o número de funcionários; Ramo de atividade; Intensidade tecnológica; e Tipo de proprietário. O questionário também incluiu perguntas sobre se as corporações tinham uma estratégia formulada, se planejavam investir em tecnologia e uma avaliação subjetiva do nível da Indústria 4.0 em sua organização.

A análise fatorial exploratória foi utilizada para explorar as principais dimensões e gerar um novo índice da Indústria 4.0. As escalas dos itens usados na análise fatorial foram avaliadas em uma escala de 1 a 4 para verificar o nível de maturidade da Indústria 4.0. A análise fatorial ajudou em particular a determinar a estrutura interna de covariância de índices de variáveis e a diferenciar diferentes grupos de fatores. A adequação da estrutura de dados para a análise fatorial foi analisada pelo teste de esfericidade de Bartlett e o teste Kaiser - Meyer - Olkin (KMO). Calculada a razão de

adequação da amostra de KMO, obteve-se o valor de 0,8495, o que foi considerado alto (maior que 0,7), tornando a análise fatorial apropriada.

Os resultados da pesquisa foram posteriormente processados por meio de uma análise estatística. O objetivo dessa análise foi comparar os resultados com o índice VPI4.

Primeiramente, a distribuição do índice VPI4 dentro da primeira onda da pesquisa foi comparada com os resultados do índice na segunda onda da pesquisa. Devido à anormalidade dos dados, foi necessária a aplicação do teste de Mann-Whitney-Wilcoxon para as amostras independentes.

Trabalharam as seguintes hipóteses com um nível de significância de 5%:

1ª hipótese: Os índices VPI4 da primeira onda e da segunda onda de pesquisa são populações similares ou são populações diferentes;

2ª hipótese: Não há uma dependência entre a percepção da Indústria 4.0 nas empresas e o índice VPI4 ou há dependência entre estes.

3ª hipótese: Não há uma diferença entre o nível da Indústria 4.0 (VPI4) em empresas de alta e média alta tecnologia (HTI) e em empresas de baixa e média baixa tecnologia (LTI) ou há diferença entre esses níveis.

Os resultados foram divididos em três (3) seções: análise fatorial, índice da Indústria 4.0 e verificação e avaliação do índice da Indústria 4.0

A análise fatorial baseou-se nas variáveis sobre as quais as empresas foram questionadas em relação à implementação da Indústria 4.0. Foram analisados 17 itens do questionário e incluídos na análise fatorial exploratória. Destes, 4 itens (Drones, Veículos autônomos, Manufatura aditiva - 3D - e Nanotecnologia) foram eliminados da análise fatorial, 2 itens por não apresentarem melhora na situação após rotações e testes adicionais e 2 itens por apresentarem baixa carga fatorial (inferior a 0,4). Além disso, não foram muito utilizados nas empresas pesquisadas. Com isso, 13 variáveis foram selecionadas para o desenho final.

Esses resultados foram posteriormente utilizados para criar um índice para o nível de implementação da Indústria 4.0 (VPI4) na empresa. Com base nesses dados, foi possível dividir treze (13) áreas em três (3) níveis de implantação da Indústria 4.0 na empresa, onde os números após cada área representam sua carga fatorial.

O primeiro nível de introdução da Indústria 4.0 em uma empresa consiste nas seguintes áreas:

- Ter as pessoas certas (mecatrônica, montador, tecnólogo) - 0,61;
- Coletar dados - 0,82;
- Armazenar dados na nuvem - 0,63;
- Analisar os dados - 0,86.

O segundo nível de introdução da Indústria 4.0 em uma empresa consiste nas seguintes áreas:

- Infraestrutura de TI (velocidade, estabilidade) - 0,53;
- Sistemas de Execução de Manufatura ou *Manufacturing Execution Systems* (MES) - ERP - 0,75;
- Uso de dados vinculados (M2M) - 0,58;
- Uso de robôs, braços robóticos (na produção e em outros lugares) - 0,54;
- Terminais móveis - 0,54;
- Uso de sensores - 0,58.

O terceiro nível de introdução da Indústria 4.0 em uma empresa consiste nas seguintes áreas:

- Uso de software de aprendizagem - 0,44;
- Fornecedores podem usar nossos dados (opções de resposta, previsões) - 0,67;
- Uso de realidade virtual (gêmeos digitais, simulação) - 0,68.

Na segunda onda, os resultados da pesquisa e questões complementares que identificam a percepção subjetiva das empresas e o impacto da intensidade tecnológica da indústria também foram utilizados para avaliar os resultados do índice VPi4.

Com base nos resultados, foi elaborada uma tabela de desempenho, de forma que uma empresa seja capaz de determinar o nível de implementação da Indústria 4.0 dentro da empresa com base nas respostas às perguntas. A empresa descobre a

pontuação geral e o cumprimento dos diferentes níveis da Indústria 4.0. Ao mesmo tempo, também pode comparar o resultado com outras empresas do setor, onde um conjunto de cinco (5) ícones mostra a posição em comparação com outras empresas. Cada ícone mostra uma distribuição de amostra de 20%.

Os dados da primeira e segunda ondas da pesquisa foram utilizados para avaliar a distribuição dos dados. Os níveis se sobrepuseram, no entanto, a maioria das empresas atingiu o nível superior 1, enquanto o segundo e o terceiro níveis apresentaram pontuações próximas de zero. A distribuição das empresas na segunda onda também foi semelhante. No total, cinco (5) empresas na primeira onda alcançaram valores absolutamente zero em VPI4.

Além disso, a distribuição do índice VPI4 foi comparada estatisticamente, usando as amostras da primeira onda e da segunda onda da pesquisa. Por esse motivo, as estatísticas do teste Mann-Whitney-Wilcoxon foram usadas para comparar as amostras. Mostrou-se que, em todos os níveis do índice VPI4, exceto o terceiro nível, os resultados da primeira e da segunda onda de pesquisa foram idênticos. Diferenças foram encontradas apenas no terceiro nível com um p-valor = 0,0267. No entanto, o terceiro nível do índice é muito específico, pois uma classificação mais elevada nesse nível é frequentemente mais difícil para as empresas alcançarem após os dois primeiros níveis serem atingidos. As empresas da segunda onda alcançaram um nível mais alto do índice VPI4 no nível 3 do que na primeira onda. Os resultados também mostram que houve diferença na autopercepção e autoavaliação da utilização da Indústria 4.0 para as empresas na primeira e segunda ondas.

A comparação dos resultados dos índices na primeira e segunda ondas da pesquisa mostram que a 1ª hipótese não pode ser rejeitada, pois os resultados de ambas as pesquisas apresentaram as mesmas distribuições.

A relação do Índice com a intensidade da tecnologia na indústria confirmou a hipótese alternativa, alegando que as empresas de alta tecnologia têm um nível superior de Indústria 4.0 (VPI4). Na segunda fase de implantação da Indústria 4.0, foi possível comprovar as diferenças entre os grupos. As empresas com maiores demandas tecnológicas costumavam ser mais bem-sucedidas.

Em relação ao impacto da Indústria 4.0, os autores comprovaram que 62% das empresas se sentem influenciadas pela Indústria 4.0 e 65,7% das empresas

começaram a implementar a Indústria 4.0 porque consideram importante para o seu futuro.

Os resultados indicaram que o índice VPI4 foi consistente em termos de distribuição ao comparar os resultados da amostra de verificação. Seus resultados se correlacionam com a percepção subjetiva das empresas e os diferentes níveis do índice refletem a diferença de intensidade tecnológica da indústria. O índice VPI4 permite que as empresas determinem seu próprio nível de estado atual de prontidão para a Indústria 4.0, para priorizar melhor o desenvolvimento de seus negócios. A solução proposta pelos autores apresentou categorias para os componentes da Indústria 4.0 em uma estrutura teórica adequada. Pesquisas futuras têm a possibilidade da aplicação do índice em outros setores, com empresas de tamanhos diferentes e atualizações quanto às novas tendências da TI.

No entanto, esse estudo teve várias limitações que devem ser consideradas. O índice VPI4 não inclui algumas aplicações específicas da indústria de tecnologias da Indústria 4.0, como uso de drones, impressoras 3D, nanotecnologia e veículos autônomos, devido à menor incidência nos negócios monitorados. No futuro, os autores assumem que, com o aumento da sua utilização nas empresas, o índice será complementado por essas aplicações específicas.

As limitações da pesquisa ocorreram por conta do desconhecimento do material e da terminologia por parte dos respondentes, bem como o fato de os respondentes apenas reportarem a sua perspectiva individual sobre a situação e de tentarem retratar a situação/negócios por um aspecto melhor.

Em termos de verificação do índice VPI4 resultante, os autores planejam realizar uma análise fatorial confirmatória em combinação com o método de modelagem de equações estruturais para refinar ainda mais o ajuste de fatores individuais dentro da terceira onda da pesquisa. Também será incluída a criação de um modelo de implementação da Indústria 4.0. No entanto, resultados recentes da segunda onda de pesquisa e comparação apresentados nesse trabalho sugerem que é improvável que esta seja uma intervenção significativa na configuração dos coeficientes de diferentes variáveis e fatores de índice. Os autores também planejam analisar a relação do índice com o tamanho das empresas.

Com relação à coleta de dados, o índice VPI4 não teve e não tem como objetivo principal apenas determinar o nível da Indústria 4.0 na República Tcheca.

Outra desvantagem do índice pode ser o fato de que as empresas que operam na República Tcheca participaram da pesquisa apenas em ambas as ondas. No caso das grandes empresas, no entanto, a maioria destas eram empresas estrangeiras, da União Europeia, principalmente da Alemanha. Na terceira onda da pesquisa, os autores também planejam fazer pesquisas no exterior e incluir empresas de países desenvolvidos como Japão, Estados Unidos, entre outros.

O índice VPI4 proposto é apenas o primeiro resultado do projeto Indústria 4.0, que trata do assunto de forma mais abrangente. Pesquisas futuras trarão provavelmente mais e melhores resultados.

Os resultados indicaram que o índice VPI4 foi consistente em termos de distribuição quando comparados os resultados na amostra de verificação. Seus resultados correlacionam-se com a percepção subjetiva das empresas e os diferentes níveis do índice refletem a diferença de intensidade tecnológica da indústria.

2.2.4 Avaliação do nível de maturidade da Indústria 4.0: o caso de uma empresa estratégica de defesa

Autores: Silva, M.; Rocha, C. (2020)

Objetivo: Realizar uma avaliação do nível de maturidade de uma empresa estratégica de defesa, a Indústria de Material Bélico (IMBEL), para a Indústria 4.0. Essas empresas têm características de alta capacitação tecnológica e de fornecer Produtos Estratégicos de Defesa (PED) para as Forças Armadas Brasileiras.

O trabalho pode contribuir com o desenvolvimento de um modelo e fornecer uma ferramenta para analisar a maturidade para a Indústria 4.0 nas empresas e assim ser aplicado em organizações de ramos de atuação diferentes. Adotaram e utilizaram o modelo IMPULS - *Industrie 4.0 Readiness*, criado por Lichtblau *et al.* (2015), que contém uma série complexa de dados e de dimensões amplas.

A seguir apresenta-se o modelo dos autores, adaptado de Lichtblau *et al.* (2015), com os critérios adotados na IMBEL, que contém quadros de 2 a 7, sendo que cada quadro apresenta uma dimensão do modelo de análise da maturidade das empresas e, para cada dimensão, foram utilizados critérios específicos para se definir o perfil da organização.

Quadro 2 - Estratégia e Organização – Níveis, perfis e características

Estratégia e Organização	NÍVEL	PERFIL	CARACTERÍSTICAS
	5	Alto desempenho	<ul style="list-style-type: none"> Estratégia implementada e regularmente revisada Investimentos na Indústria 4.0 em toda a empresa Gestão de inovação uniforme e estabelecida em toda a empresa
	4	Especialista	<ul style="list-style-type: none"> Estratégia em implantação e revista esporadicamente Investimentos na Indústria 4.0 em múltiplas áreas Gestão da inovação estabelecida em múltiplos departamentos
	3	Experiente	<ul style="list-style-type: none"> Estratégia para a Indústria 4.0 formulada Investimentos para a Indústria 4.0 em algumas áreas Gestão da inovação em áreas isoladas
	2	Intermediário	<ul style="list-style-type: none"> Estratégia para a Indústria 4.0 desenvolvida e sistema de indicadores definidos Investimentos na Indústria 4.0 a um nível baixo
	1	Iniciante	<ul style="list-style-type: none"> Iniciativas piloto nos departamentos Investimentos iniciais na Indústria 4.0
	0	<i>Outsider</i>	<ul style="list-style-type: none"> Nenhum requisito foi cumprido

Fonte: Silva e Rocha (2020, p. 38, adaptado de Lichtblau *et al.*, 2015).

Na dimensão Estratégia e Organização, utilizaram-se de três (3) critérios: *status* da estratégia de implantação; operacionalização e revisão da estratégia por meio de um sistema de indicadores; e valores de investimentos. Cada critério foi classificado em um determinado nível, conforme Quadro 2, e em seguida calculou-se a média aritmética dos níveis dos critérios para se definir o perfil da organização nessa dimensão.

Quadro 3 - Fábrica Inteligente – Níveis, perfis e características

Fábrica Inteligente	NÍVEL	PERFIL	CARACTERÍSTICAS
	5	Alto desempenho	<ul style="list-style-type: none"> • A infraestrutura de equipamentos satisfaz as funcionalidades futuras • Todos os dados são coletados e utilizados • Suporte abrangente ao sistema de TI dos processos
	4	Especialista	<ul style="list-style-type: none"> • A infraestrutura atual dos equipamentos atende aos requisitos ou é atualizável • A maioria dos dados são coletados e alguns são utilizados • Suporte abrangente de TI de processos (integrados ao sistema)
	3	Experiente	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionalidades futuras (parcialmente) satisfeitas ou totalmente atualizáveis • Dados relevantes são coletados digitalmente e utilizados em algumas áreas • Sistemas de TI suportam processos e são ligados por meio de interfaces
	2	Intermediário	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionalidades futuras (parcialmente) satisfeitas ou atualizáveis até certo ponto • Os dados são coletados (mas em grande parte manualmente) e utilizados para algumas atividades • Algumas áreas da empresa são apoiadas por sistemas de TI e sistemas integrados
	1	Iniciante	<ul style="list-style-type: none"> • A infraestrutura atual do equipamento satisfaz alguns dos requisitos futuros • Processo empresarial principal suportado pelo sistema de TI
	0	<i>Outsider</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Não há requisitos atendidos

Fonte: Silva e Rocha (2020, p. 39, adaptado de Lichtblau *et al.*, 2015).

Na dimensão Fábrica Inteligente, foram analisados quatro (4) critérios: modelagem digital; infraestrutura de equipamentos; uso de dados; e sistemas de TI. Cada critério foi classificado em um determinado nível, conforme Quadro 3, e em seguida calculou-se a média aritmética dos níveis dos critérios para se definir o perfil da organização nessa dimensão.

Quadro 4 - Operações Inteligentes – Níveis, perfis e características

Operações Inteligentes	NÍVEL	PERFIL	CARACTERÍSTICAS
	5	Alto desempenho	<ul style="list-style-type: none"> • Compartilhamento completo de informações integradas ao sistema • Processos autônomos de controle e autorreação implementados • Segurança abrangente de TI e soluções em nuvem implementadas
	4	Especialista	<ul style="list-style-type: none"> • Compartilhamento de informações de longo alcance integrado ao sistema • Teste de controle autônomo e processos de auto reação • Segurança de TI de longo alcance e soluções em nuvem em uso
	3	Experiente	<ul style="list-style-type: none"> • Algum compartilhamento de informações integrado ao sistema • Soluções de segurança de TI parcialmente implementadas • Soluções iniciais para software baseado em nuvem, armazenamento e análise de dados
	2	Intermediário	<ul style="list-style-type: none"> • Compartilhamento interno de informações parcialmente implementadas • Múltiplas soluções de segurança de TI planejadas ou soluções iniciais em desenvolvimento
	1	Iniciante	<ul style="list-style-type: none"> • Primeiros passos para o compartilhamento de informações internas e integradas ao sistema • Soluções iniciais de segurança de TI planejadas
	0	<i>Outsider</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Não há requisitos atendidos

Fonte: Silva e Rocha (2020, p. 39, adaptado de Lichtblau *et al.*, 2015).

A dimensão Operações Inteligentes foi determinada por quatro (4) critérios: compartilhamento de informações; uso de *cloud computing*; segurança da TI; e autonomia dos processos. Cada critério foi classificado em um determinado nível, conforme Quadro 4, e em seguida obteve-se a média aritmética dos níveis dos critérios para se definir o perfil da organização nessa dimensão.

Quadro 5 - Produtos Inteligentes – Níveis, perfis e características

Produtos Inteligentes	NÍVEL	PERFIL	CARACTERÍSTICAS
	5	Alto desempenho	<ul style="list-style-type: none"> Os produtos apresentam funcionalidades adicionais abrangentes Uso abrangente de dados coletados para várias funções
	4	Especialista	<ul style="list-style-type: none"> Os produtos apresentam funcionalidades adicionais em diferentes áreas Uso direcionado de dados coletados para determinadas funções
	3	Experiente	<ul style="list-style-type: none"> Os produtos têm várias funcionalidades adicionais interconectadas Apenas alguns dados coletados são utilizados para análise
	2	Intermediário	<ul style="list-style-type: none"> Produtos têm primeiros sinais de funcionalidades adicionais Os dados são coletados, mas não analisados e utilizados
	1	Iniciante	<ul style="list-style-type: none"> Produtos têm primeiros sinais de funcionalidades adicionais
	0	<i>Outsider</i>	<ul style="list-style-type: none"> Não há requisitos atendidos

Fonte: Silva e Rocha (2020, p. 40, adaptado de Lichtblau *et al.*, 2015).

A dimensão Produtos Inteligentes foi determinada observando-se as funcionalidades adicionais dos produtos e a porcentagem que os dados coletados são utilizados. Cada critério foi classificado em um determinado nível, conforme Quadro 5, e em seguida obteve-se a média aritmética dos níveis dos dois critérios para se definir o perfil da organização nessa dimensão.

Quadro 6 - Serviços Orientados por Dados – Níveis, perfis e características

Serviços Orientados por Dados	NÍVEL	PERFIL	CARACTERÍSTICAS
	5	Alto desempenho	<ul style="list-style-type: none"> Serviços acionados por dados por meio da integração com o cliente Receitas geradas por serviços (> 10%) Alta taxa de uso de dados (> 50% dos dados coletados)
	4	Especialista	<ul style="list-style-type: none"> Serviços acionados por dados por meio da integração com o cliente Receitas geradas por serviços (< 10%) Uso de dados (20% a 50% dos dados coletados)
	3	Experiente	<ul style="list-style-type: none"> Serviços baseados em dados, mas sem integração com o cliente Baixa receita gerada por serviços (< 7,5%) Uso de dados (20% a 50% dos dados coletados)
	2	Intermediário	<ul style="list-style-type: none"> Serviços baseados em dados, mas sem integração com o cliente Baixa receita gerada por serviços (< 2,5%) Baixa utilização de dados (<20% dos dados coletados)
	1	Iniciante	<ul style="list-style-type: none"> Serviços baseados em dados, mas sem integração com o cliente Receita inicial gerada por serviços (< 1%)
	0	<i>Outsider</i>	<ul style="list-style-type: none"> Não há requisitos atendidos

Fonte: Silva e Rocha (2020, p. 40, adaptado de Lichtblau *et al.*, 2015).

Na dimensão Serviços Orientados por Dados, utilizaram-se de três (3) critérios: disponibilidade de serviços orientados por dados; compartilhamento de receitas oriundas de dados; e serviços e compartilhamento de dados. Cada critério foi classificado em um determinado nível, conforme Quadro 6, e em seguida obteve-se a média aritmética dos níveis dos critérios para se definir o perfil da organização nessa dimensão.

Quadro 7 - Funcionários – Níveis, perfis e características

Funcionários	NÍVEL	PERFIL	CARACTERÍSTICAS
	5	Alto desempenho	<ul style="list-style-type: none"> Os funcionários possuem habilidades em várias áreas relevantes
	4	Especialista	<ul style="list-style-type: none"> Os funcionários possuem níveis de qualificação adequados em várias áreas relevantes
	3	Experiente	<ul style="list-style-type: none"> Os funcionários possuem níveis de qualificação adequados em algumas áreas relevantes
	2	Intermediário	<ul style="list-style-type: none"> Os funcionários têm baixos níveis de qualificação em poucas áreas relevantes
	1	Iniciante	<ul style="list-style-type: none"> Os funcionários têm baixos níveis de habilidade em uma área relevante
	0	<i>Outsider</i>	<ul style="list-style-type: none"> Não há requisitos atendidos

Fonte: Silva e Rocha (2020, p. 40, adaptado de Lichtblau *et al.*, 2015).

A dimensão Funcionários foi determinada pela análise das habilidades dos funcionários em várias áreas da empresa, tendo sido classificado um determinado nível, conforme Quadro 7, para se definir o perfil da organização nessa dimensão.

As respostas do questionário formulado pela fundação alemã IMPULS, que foi traduzido e adaptado pelos autores, foram recebidas no *Google Forms*, relacionadas de forma qualitativa com as características das seis (6) dimensões (Quadros 2 a 7) e pontuadas numa escala de 0 a 5. Posteriormente, foi calculada a média aritmética dessas pontuações encontrando-se o resultado geral. Com isso, foi possível verificar o nível para a implantação da Indústria 4.0, e a empresa foi categorizada em recém-chegada, aprendiz ou líder, conforme Quadro 8.

Quadro 8 - Níveis de categorização de implantação da Indústria 4.0

CATEGORIZAÇÃO	NÍVEIS	CARACTERÍSTICAS
Recém-chegados (<i>Newcomers</i>)	0 a 1	As empresas que nada fizeram ou muito pouco em relação à implantação
Aprendizes (<i>Learners</i>)	2	As empresas já deram seus primeiros passos para a implantação
Líderes (<i>Leaders</i>)	3 acima	As empresas possuem estratégias implementadas e estão à frente das demais empresas do setor, sendo referência

Fonte: Silva e Rocha (2020, p. 41, adaptado de Lichtblau *et al.*, 2015).

Ao fazer a análise das dimensões de maturidade da IMBEL, notou-se que de 0 a 5, a empresa atingiu os seguintes valores nas dimensões: Estratégia e Organização=2; Fábrica Inteligente=2; Operações Inteligentes=1; Produtos Inteligentes=2; Serviços Orientados por Dados=1; e Funcionários=4. A média aritmética calculada foi igual a 2. Com isso, os resultados mostraram que a IMBEL apresentou um resultado intermediário no nível de maturidade, classificado em um modelo de maturidade da Indústria 4.0 como aprendiz.

Silva e Rocha (2020) buscaram avaliar o nível de maturidade de uma Empresa Estratégica de Defesa (EED) para a Indústria 4.0. Desenvolveram uma pesquisa bibliográfica, qualitativa e descritiva, e utilizaram o questionário desenvolvido pela Fundação IMPULS, na Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL). Os resultados revelaram que a empresa analisada apresenta um nível de maturidade intermediário, categorizada como aprendiz em um modelo de maturidade da Indústria 4.0.

O trabalho dos autores desenvolveu um modelo de maturidade que pode ser utilizado como instrumento de análise da maturidade da Indústria 4.0 em empresas de diferentes setores. O questionário elaborado pode ser utilizado por empresas de manufatura de diferentes setores, para avaliar o nível de maturidade da Indústria 4.0, com a finalidade de identificar as estratégias e o *status* de implementação para este novo cenário.

Os autores recomendam a aplicação de entrevistas com os gestores dos setores de manufatura com foco em investigar as percepções sobre as limitações e possibilidades na evolução em direção à Quarta Revolução Industrial.

Esse modelo para avaliar o nível de maturidade não pretendeu mostrar que a implantação rumo à Indústria 4.0 seja fácil, muito menos simples, contudo, a ferramenta pode colaborar para que os gestores tenham noção e percepção e apresentar uma avaliação das potencialidades atuais e futuras necessidades das organizações, descrevendo informações para a tomada de decisão para com as novas tecnologias que surgem com a Quarta Revolução Industrial. Esse modelo dos autores serviu de base na elaboração do modelo deste trabalho.

2.2.5 A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises

Autores: Schumacher, A.; Erol, S.; Sihn, W. (2016)

Propuseram um novo modelo empiricamente fundamentado e a implementação para avaliar a maturidade de empresas industriais de manufatura da Indústria 4.0. Definiram nove dimensões e atribuíram 62 itens a elas para avaliar a maturidade da Indústria 4.0. A amostra da pesquisa foi uma empresa austríaca com 400 funcionários, que fabrica peças aeroespaciais e equipamentos de teste.

O modelo possui uma estrutura baseada em conceitos teóricos e busca apresentar resultados explicados de forma transparente. As outras análises listadas forneceram menos informações sobre o processo de desenvolvimento e método de avaliação e, portanto, sem a possibilidade para uma comparação mais detalhada. Outros modelos que não ofereceram detalhes sobre a estrutura e conteúdo não foram considerados no estudo.

Teve como foco as tecnologias desenvolvidas nos aspectos da organização. As nove dimensões foram definidas da seguinte forma: Produtos, Clientes, Operações e Tecnologia foram criados para avaliar os capacitadores básicos. Depois adicionaram as dimensões Estratégia, Liderança, Governança, Cultura e Pessoas, buscando incluir aspectos organizacionais na avaliação.

- Produtos – aponta a digitalização como fator integrante dos produtos e outros recursos e sistemas, discorre sobre a flexibilidade da reconfiguração desses produtos, tratando-os de forma personalizada;

- Clientes e governança – analisa questões do ambiente externo às empresas que interferem, de forma positiva ou negativa, em suas operações. Dentre essas questões, destacam-se: a legislação trabalhista vigente, os atributos ligados ao conhecimento, a padronização de tecnologias (incluindo os padrões emergentes), administração de sistemas e análise digital. Além disso, em relação aos serviços prestados aos clientes, analisa a maneira de utilizar os dados relacionados às vendas. (*Big Data e Big Data Analysis*);
- Operações – discorre sobre uma gestão descentralizada, com processos digitalizados e uma cooperação interdisciplinar e interdepartamental;
- Tecnologia – contempla o aumento da eficiência das operações e das comunicações, tanto homem-máquina, como máquina a máquina, por meio da utilização de novas tecnologias;
- Estratégia – analisa a compatibilidade da estratégia colaborativa com a Indústria 4.0, bem como a gestão de recursos necessária para a realização das mudanças no modelo de negócios, a fim de adaptá-la às exigências da Indústria 4.0;
- Liderança – para atender às exigências da Indústria 4.0, recomenda-se uma coordenação centralizada;
- Cultura – ressalta a disposição às inovações, a cooperação organizacional e a importância das TICs;
- Pessoas – destaca as competências e a disposição dos colaboradores com as tecnologias inovadoras e sua autonomia para tomar decisões.

Além de avaliarem as principais situações e as inovações tecnológicas que auxiliam na implantação da Indústria 4.0, destacaram também que a implementação de tecnologias avançadas na linha de produção pode proporcionar vantagens competitivas, além de criar outras oportunidades de negócios e criar enormes transformações em toda a cadeia de valor.

O estudo destacou que um dos principais pontos da Indústria 4.0 é a integração promovida pelas tecnologias inovadoras que surgem, em especial as TICs. Esse modelo de maturidade ressaltou a comunicação das máquinas entre si, os processos independentes, recursos relevantes e fundamentais para a implantação da Indústria 4.0.

Em termos de gerenciamento estratégico, esse modelo de maturidade para avaliar a Indústria 4.0 destacou a quantidade de recursos que precisam ser adquiridos, além da necessidade de um apoio total da direção.

2.2.6 Analysis of the current state of Croatian manufacturing industry with regard to Industry 4.0

Autores: Veza, I.; Mladineo, M.; Peko, I. (2015)

O principal objetivo desse projeto foi criar o modelo croata de *Innovative Smart Enterprise*. Buscaram realizar um ajuste regional do modelo e, assim, sincronizar o modelo de fábrica inteligente com uma forma regional específica de produzir de maneira tradicional, organizar e com uma educação específica, mas, especialmente, auxiliar as empresas croatas a preencherem a lacuna entre as suas competências (Indústria 2.0) e as competências e capacidades das empresas da União Europeia (Indústria 3.0 migrando para Indústria 4.0).

Os autores realizaram uma pesquisa com questionários on-line e entrevistas com CEOs e/ou diretores técnicos de empresas de manufatura na Croácia. O objetivo foi reunir os dados de grande número de empresas com questionários que buscaram descrever completamente as empresas. A análise e as conclusões sobre o estado atual da indústria transformadora croata baseou-se nas respostas de 159 empresas croatas.

Após a identificação da empresa, foi feito um conjunto de nove questões, representando os aspectos mais importantes da manufatura, levantando:

1. Qual a melhor descrição da fase de desenvolvimento do produto em sua empresa?
2. Qual a melhor descrição de tecnologia em seu sistema de produção?
3. Qual a melhor descrição de gerenciamento de ordens de serviço em seu sistema de produção?
4. Qual a melhor descrição do monitoramento da rastreabilidade da produção em seu sistema de produção?

5. Qual a melhor descrição de gerenciamento de estoque de materiais (materiais no estoque de entrada e materiais de produção inacabada) em seu sistema de produção?
6. Qual a melhor descrição de gerenciamento de estoque de produtos acabados em seu sistema de produção?
7. Qual a melhor descrição de Garantia de Qualidade em seu sistema de produção?
8. Qual a melhor descrição de Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto em seu sistema de produção?
9. Qual a melhor descrição da aplicação do Sistema Toyota de Produção (TPS - Toyota Production System) e do conceito de Produção verde e enxuta (GALP - *Green and Lean Production*) em seu sistema de produção?

Cada resposta teve um valor de 1 a 4, representando uma das quatro (4) gerações industriais históricas. Analisaram o estado atual da indústria manufatureira croata em relação à Indústria 4.0.

Verificaram que a Croácia está longe de implantar a Indústria 4.0. Um nível médio de maturidade industrial da Croácia foi estimado em 2,15, o que representou a 2ª geração industrial, ou seja, meados do século XX. Isso significa que a fabricação croata, a tecnologia e os conceitos organizacionais ainda são semelhantes aos de 50/60 anos atrás. A 3ª geração industrial (produção automatizada, robôs de produção, entre outros) não é a tendência dominante na indústria de manufatura croata. De acordo com essa pesquisa, menos de 30% das empresas pertencem à Indústria 3.0.

2.2.7 Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization roadmap

Autores: De Carolis, A. Macchi, M. Negri, E. Terzi, S. (2017)

Conforme o título do trabalho, os autores buscaram nortear as empresas de manufatura para a digitalização, com uma metodologia que suportasse as empresas de manufatura na definição de seu roteiro de digitalização.

Esse estudo teve foco na verificação do nível de maturidade em que se encontram as empresas para a Indústria 4.0. Tiveram como base a CMMI, que tem

reconhecimento internacional, consolidação na literatura e uma referência utilizada de forma ampla para avaliar o nível de maturidade das empresas das mais diversas áreas do mercado, identificando seus pontos e a utilização de novas tecnologias. É uma metodologia para melhoria de processos, que combina as melhores práticas de diversos setores.

A partir desse modelo CMMI, desenvolveram o modelo DREAMY que realizou uma análise e avaliação do desempenho digital da indústria e considerou as atividades geradoras de valor na indústria, com processos macros principais. Descreveu cinco (5) áreas específicas: (1) design e engenharia; (2) gestões da produção; (3) da qualidade; (4) da manutenção; e (5) da logística. Dessa forma, definiu quatro (4) dimensões: processo; monitoramento e controle; tecnologia; e organização (Gobo Junior, 2020).

O *Software Engineering Institute* desenvolveu o modelo CMMI. Propôs seis (6) níveis de amadurecimento responsáveis por demonstrar o caminho rumo ao desenvolvimento e a qualificação das empresas em relação à Quarta Revolução Industrial. Detalhou, nesse âmbito, o estágio evolutivo e os objetivos preestabelecidos, garantindo, desse modo, o sucesso de cada etapa na chegada ao estágio posterior. O modelo focou no uso de tecnologias voltadas para a cadeia de suprimentos e foi apresentado por meio de um questionário estruturado, levou em consideração as áreas de processos, desse modo, observou-se a capacidade da empresa em relação às quatro (4) dimensões (processo; monitoramento e controle; tecnologia e organização).

A seguir, são apresentados os seis (6) estágios de maturidade para cada dimensão:

- Estágio 0 – Planejamento;
- Estágio 1 – Iniciação;
- Estágio 2 – Gerenciamento;
- Estágio 3 – Definição;
- Estágio 4 – Gerenciamento quantitativo;
- Estágio 5 – Otimização.

Conforme a empresa atinge um determinado estágio de maturidade, evoluirá o seu nível e também os seus processos de manufatura à Indústria 4.0.

Os seis (6) estágios de avaliação podem variar de nível 0 (baixo) até nível 5 (alto). Tais níveis estão atrelados às dimensões previamente definidas e são demonstrados e avaliados como:

- Nível 0 – *Status* crítico;
- Nível 1 – *Status* inicial;
- Nível 2 – *Status* de alerta;
- Nível 3 – *Status* aceitável;
- Nível 4 – *Status* ótimo;
- Nível 5 – *Status* ideal.

Foram realizados três (3) estudos de caso e os dados foram coletados a partir de entrevistas com gerentes do terceiro nível das empresas. As análises foram realizadas com os seguintes objetivos: (1) identificar possíveis ações ou oportunidades das quais as empresas de manufatura analisadas poderiam se beneficiar; (2) coletar evidências empíricas sobre possíveis traços comuns dos resultados obtidos com a análise desenvolvida pelo DREAMY.

2.2.8 Factors affecting adoption of Industry 4.0 by small- and medium-sized enterprises: a case in Ho Chi Minh City, Vietnam

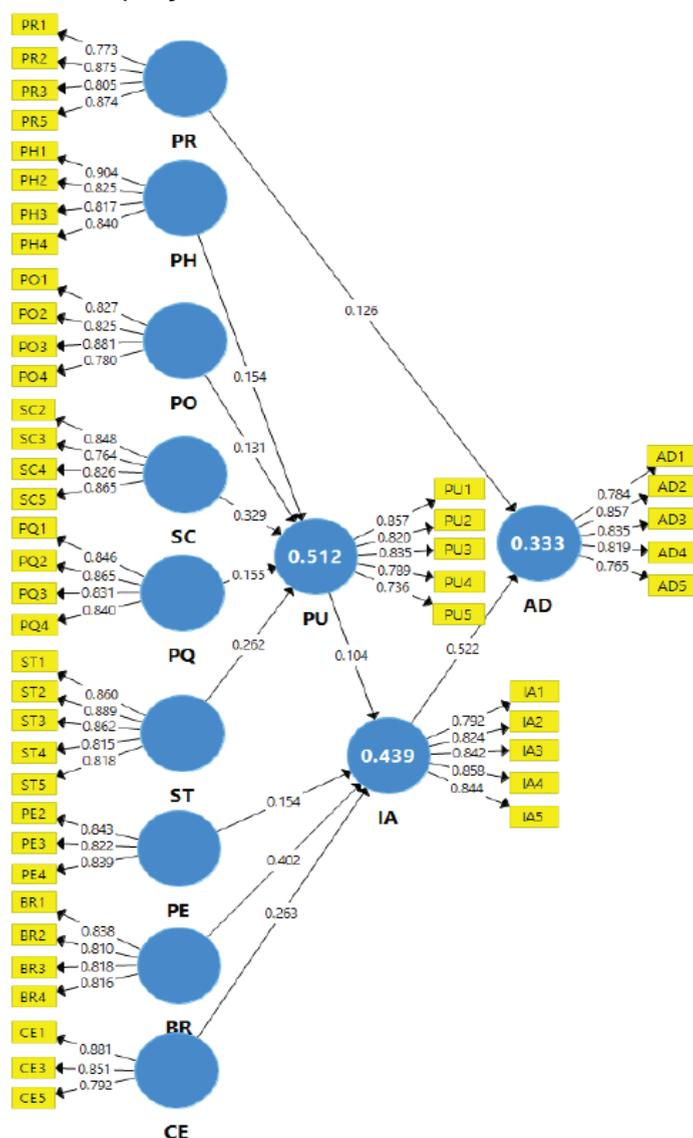
Autores: Nguyen, X. T.; Luu, Q. K. (2020)

Para os autores, embora a Quarta Revolução Industrial tenha atraído a atenção de acadêmicos nos últimos anos, ainda não estão disponíveis pesquisas sobre fatores sistemáticos e abrangentes que afetam a adoção da Indústria 4.0 por PME's em países em desenvolvimento, em especial no Vietnã.

O objetivo dos autores foi explorar o impacto dos fatores influenciadores na adoção real da Indústria 4.0 pelas PME's na cidade de Ho Chi Minh.

Com base em uma modelagem de equações estruturais, conforme Figura 3, e em um modelo conceitual, os autores apresentaram cinco (5) percepções de construtos independentes que têm um efeito positivo significativo sobre a percepção da utilidade: (i) desenvolvimento dos recursos humanos; (ii) pontualidade; (iii) economia de custo; (iv) melhoria na qualidade do produto; e (v) economia de tempo. Essa percepção da utilidade – com outros três (3) construtos independentes: (i) facilidade de uso; (ii) recursos de negócios; e (iii) condições do ambiente de negócios – tem um impacto positivo na intenção da adoção. Por fim, concluíram que essa intenção da adoção e a percepção de relacionamento aprimorado com o cliente têm um efeito positivo na adoção real da Indústria 4.0 pelas PME's na cidade de Ho Chi Minh, no Vietnã (Nguyen; Luu, 2020).

Figura 3 - Modelo de Equação Estrutural



Fonte: Nguyen e Luu (2020, p. 262).

O modelo conceitual e 12 hipóteses foram testados usando *bootstrapping*. Considerando os resultados obtidos, indicou-se o valor do modelo de ajuste e as variáveis globais foram suportadas. Onze hipóteses foram significativas e com Valor-P menor que 0,05, exceto para H5. No geral, todas as hipóteses relacionadas ao coeficiente de caminho foram suportadas de 0,104 a 0,552, conforme Figura 3. Portanto, 11 hipóteses foram suportadas e uma hipótese (H5) foi rejeitada.

Os resultados parecem sugerir que os esforços gerenciais visando aumentar a percepção dos fatores de adoção da Indústria 4.0 e a relevância da tecnologia contribuirão para o sucesso da implementação, onde o sucesso é definido como o uso efetivo da Indústria 4.0. Os softwares SPSS e SmartPLS 3 foram empregados para auxiliar na análise dos dados coletados.

Essa pesquisa contribuiu para a análise e compreensão dos fatores que influenciam na aplicação da Indústria 4.0 e também na adoção real desta pelas PME's na cidade de Ho Chi Minh, no Vietnã. Segundo os autores, o estudo tem limitações, pois considerou apenas a realização de pesquisas com pessoas de alto nível das empresas para representar negócios como CEO, CMO e alta administração. Portanto, os resultados da pesquisa foram influenciados, em parte, pela percepção subjetiva destes que ainda não são capazes de refletir plenamente a realidade do negócio.

2.2.9 Development of professional competencies for Industry 4.0 project management

Autores: Cerezo-Narvaez, A.; Otero-Mateo, M.; Pastor-Fernandez, F. (2017)

Para avaliar a importância da gestão de projetos na Indústria 4.0, os autores propuseram um modelo de equação estrutural, que fornece fortes relações causais entre as habilidades da gestão de projetos, desde mudança e transformação, características de dimensão intrínseca e direcionadores de valor da Indústria 4.0.

A pesquisa destacou a importância das pessoas no contexto da Indústria 4.0. A Quarta Revolução Industrial não está baseada somente nos recursos tecnológicos, mas também na criatividade das pessoas que aplicam esses recursos. Seguem a

premissa de que somente a tecnologia, por si só, não garantirá o sucesso desejado dos projetos e que o fator humano não pode e não deve ser esquecido jamais.

Segundo os autores, as organizações precisam desenvolver a capacidade de aceitar, adotar e explorar as atualizações tecnológicas, além da integração de dados e da automação, melhorando, assim, seus níveis de produtividade e eficiência, bem como os seus padrões de saúde, segurança e de meio ambiente.

A linha de base de competências da *International Project Management Association* (IPMA), que é focada em pessoas, estuda as necessidades de formação dos trabalhadores da Indústria 4.0, cujas funções vão desde atividades operacionais até as de supervisão e gestão, sugerindo um plano de desenvolvimento profissional, para melhor adaptação às mudanças.

Assim, o papel da gestão de projetos será administrar os vários conhecimentos, atitudes, aptidões e experiências, tanto específicas quanto genéricas e humanas, para facilitar o alcance de objetivos e metas. O trabalho de um gerente de projetos na Indústria 4.0 envolve a otimização de matérias-primas, redução de custos de energia, redução de desperdícios e, com isso, tornar o projeto mais eficiente e ecologicamente melhor.

Os autores desenvolveram um modelo de maturidade digital que foi utilizado como base para a elaboração de um modelo de negócio específico, conforme Figura 4, por meio de diferentes dimensões-chave da estratégia de negócios para a Indústria 4.0: (i) Modelo de negócios e táticas: avaliar a capacidade de adaptação da organização ao seu entorno e ao mercado; (ii) Processos: analisando as capacidades digitais do modelo operacional; (iii) Pessoas: identificar as habilidades e qualificações das pessoas; (iv) Organização: relacionar as capacidades da estrutura empresarial com outros agentes; (v) Infraestruturas: identificar a capacidade de transformação permitida pelos meios ciberfísicos; (vi) Resultados: avaliar o nível de incorporação de tecnologia aos produtos e serviços existentes, bem como seu potencial de digitalização.

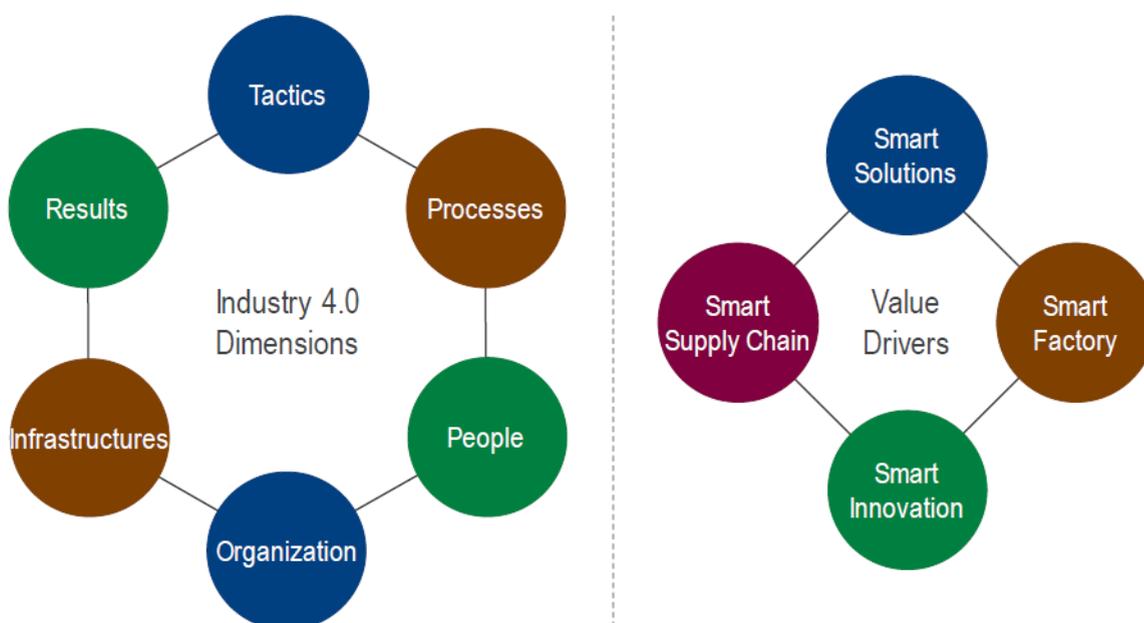
A importância da tecnologia digital é destacada para aumentar o valor do cliente, o que afeta fortemente a inovação inteligente e os modelos de colaboração.

Para uma melhor compreensão, os principais impulsionadores de valor são demonstrados na Figura 4. De um lado, “*Smart Solutions*” e “*Smart Innovation*”

permitem aproveitar o crescimento das empresas e, por outro, “*Smart Supply Chain*” e “*Smart Factory*” impulsionam as organizações com eficiência.

Por meio de questionários propostos, esses *drivers* de valor permitiram estabelecer uma relação causal com os chamados fatores-chave de sucesso.

Figura 4 - Indústria 4.0 (Dimensões e *Drivers* de Valor)

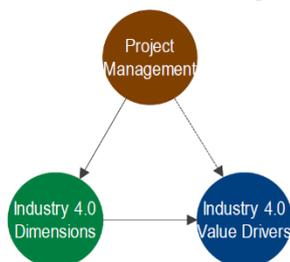


Fonte: Cerezo-Narvaez, Otero-Mateo e Pastor-Fernandez (2017, p. 489).

O capital humano tem um papel fundamental no conhecimento organizacional, pois agrega valor aos conhecimentos e competências das pessoas da empresa, e a capacidade de gerar e multiplicar pode ser bastante importante para atingir os objetivos institucionais. Refere-se ao conhecimento adquirido pelas pessoas, aumentando sua produtividade e agregando valor à sua contribuição.

A pesquisa mostrou a influência das competências do gerenciamento de projetos nas dimensões da Indústria 4.0 e essas dimensões nos drivers de valor da Indústria 4.0, estabelecendo uma relação direta e de segundo nível, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo conceitual influencia o gerenciamento de projetos com I4.0



Fonte: Cerezo-Narvaez, Otero-Mateo e Pastor-Fernandez (2017, p. 490).

Desenvolveram um Modelo de Equação Estrutural e, com os resultados obtidos, a análise causal pode ser validada, pois em todos os casos estudados, ocorreram os seguintes requisitos:

- Índice de ajuste k-quadrado dividido por seus graus de liberdade menor que 3;
- Índice de ajuste comparativo confrontando o ajuste entre o modelo independente e o estimado e estando localizado entre 0 e 1, superior a 0,9;
- *Goodness of fit index* expressando a variabilidade explicada pelo modelo proposto estimado e estando localizado entre 0 e 1, superior a 0,9;
- Erro quadrático médio de aproximação prevendo como o modelo se ajusta à matriz de covariância da amostra populacional, inferior a 8%.

A partir desse modelo descrito e baseado na norma IPMA 4.0, existe um conjunto de competências, direta e com significância relacionadas às dimensões da Indústria 4.0. As competências que afetam o desenvolvimento profissional do capital humano das organizações são fatores críticos de sucesso para avançar com segurança na implantação dos valores da Indústria 4.0. O gerenciamento de projetos por competências permite liderar pessoas, gerenciar processos e administrar recursos.

A Quarta Revolução Industrial representa um novo desafio para os gerentes de projetos, pois tem sido demonstrado que existem relações altamente relevantes entre competências comportamentais, técnicas e contextuais. Isso mostra que será necessário que estes se adaptem às novas necessidades e expectativas do setor. Uma vez confirmada a importância das pessoas na Indústria 4.0, as competências

mais críticas devem ser enfatizadas e priorizadas em pesquisas futuras, de acordo com seu impacto para a Indústria 4.0.

2.2.10 Impact of management practices on organisational innovation in the digital age: a study of the manufacturing industry in Malaysia

Autores: Rehman, H. M.; Au Yong, H. N.; Choong, Y. (2021)

Objetivo: Identificar a influência da liderança orientada para o conhecimento da gestão eletrônica de recursos humanos e da estrutura organizacional descentralizada na inovação organizacional. Adotaram um método quantitativo para estabelecer a relação entre essas três (3) variáveis com a inovação nas organizações.

Uma parte indispensável da economia é a indústria manufatureira, em especial para a Malásia, pois é o setor que, além de transformar matéria-prima em produtos acabados, contribui para a economia de um país de forma significativa. Com isso, a Malásia ocupa uma posição de destaque no mundo exportando seus produtos manufaturados.

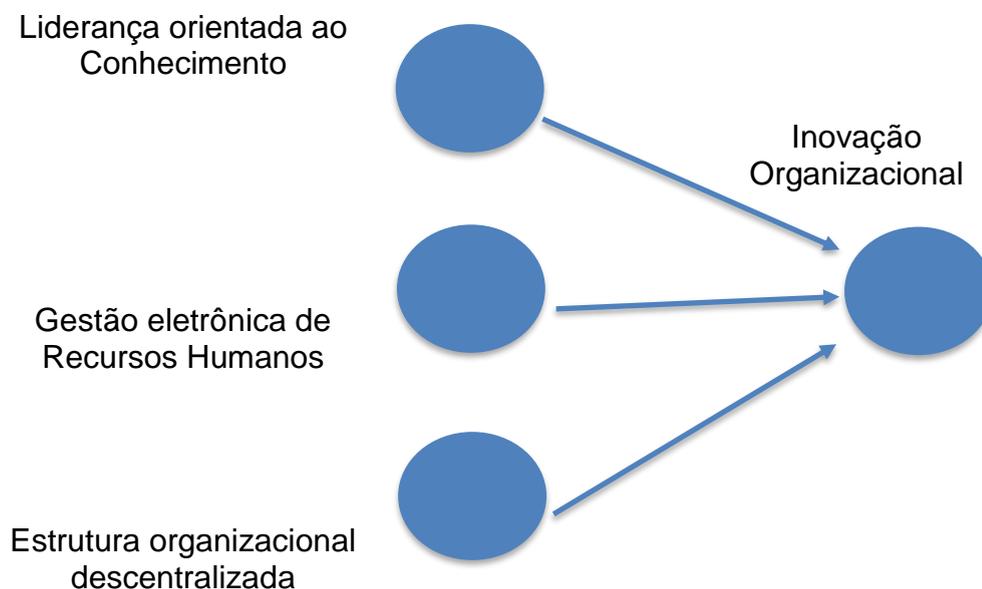
Porém, esses serviços de produção sempre exigiram e continuam exigindo atualização e inovação dos processos, a fim de atender às necessidades dos clientes que estão mudando constantemente. Com o surgimento da Indústria 4.0, as fábricas enfrentam novos desafios, como a capacidade de inovação, além de rápidas mudanças e adequações no uso das tecnologias emergentes. Essas questões podem dificultar os esforços das empresas de manufatura para participar plenamente da Indústria 4.0 da Malásia.

H1: A liderança orientada para o conhecimento tem um efeito positivo e relação significativa com a inovação organizacional.

H2: A gestão eletrônica de recursos humanos tem um efeito positivo e relação significativa com a inovação organizacional.

H3: Uma estrutura organizacional descentralizada tem um efeito positivo e relação significativa com a inovação organizacional.

Figura 6 - Estrutura Conceitual do Estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024), adaptado de Rehman, Au Yong e Choong (2021, p. 84).

Coletaram um total de 218 amostras/empresas manufatureiras da Malásia, que depois foram examinadas por meio do software SmartPLS. Os resultados da pesquisa dos autores contribuíram para o conhecimento desse campo, destacando a importância da liderança orientada para o conhecimento e da gestão eletrônica de recursos humanos na previsão da inovação organizacional.

A hipótese H1 apresentou resultado compatível com um p-valor de 0,000 e estatísticas T de 4,595; a hipótese H2 também apresentou resultado compatível com um p-valor de 0,000 e estatísticas T de 8,606 e a hipótese H3 apresentou resultado NÃO compatível com um p-valor de 0,285 e estatísticas T de 1,068.

Diante desses resultados, os autores atingiram um dos objetivos dessa pesquisa com a avaliação de como a liderança orientada para o conhecimento influencia a inovação organizacional. Essa liderança pode contribuir para que as empresas possam entender que o conhecimento por meio da inovação é primordial para obter ganhos maiores e superar a concorrência. Isso pode justificar o fato de as empresas estarem adotando esse estilo de liderança que as direcionará rumo aos desafios da inovação organizacional.

Outro objetivo do estudo foi averiguar como a gestão eletrônica de recursos humanos influencia a inovação organizacional. Essa hipótese H2 confirmou que há

uma relação significativa entre a gestão eletrônica de recursos humanos com o sucesso da inovação nas organizações. Os resultados ofereceram indicadores importantes para todos os níveis da equipe gerencial, destacando que a gestão de funcionários é extremamente importante para a inovação organizacional. As organizações são compostas por pessoas e todo desempenho depende de como estas são gerenciadas. Deve-se buscar contratar colaboradores focados em inovação, treiná-los e recompensá-los de forma justa a fim de melhorar o desempenho da empresa.

A terceira hipótese H3 foi testada e mostrou influência pouco significativa ao examinar a relação da estrutura organizacional descentralizada e a inovação organizacional. O resultado não foi suportado indicando que a estrutura da organização descentralizada não tem efeito positivo na inovação da organização. Os autores acreditavam que uma maior flexibilidade da estrutura da empresa possibilitaria que os funcionários se tornassem criativos e atingissem o seu potencial o que ajudaria num melhor desempenho organizacional.

As empresas serão confrontadas com complexidades e desafios em suas operações de negócios com a integração do conceito de inovação organizacional. O estudo pode contribuir com as partes interessadas para planejar um caminho a traçar para enfrentar os desafios da Indústria 4.0 por meio do desenvolvimento de competências de inovação.

2.2.11 Readiness and maturity of smart and sustainable supply chains: a model proposal

Autores: Demir, S.; Gunduz, M.A.; Kayikci, Y.; Paksoy, T. (2022)

Esse trabalho foi resultado de uma pesquisa na base *Web of Science* onde foram utilizadas as palavras-chave *readiness AND maturity index*. Essa pesquisa resultou em apenas seis (6) trabalhos e esse estudo foi o que apresentou a maior quantidade de referências, 189.

Segundo os autores, muitas empresas adotam as tecnologias da Indústria 4.0 para permitir a sustentabilidade operacional contra os efeitos crescentes das

mudanças climáticas, diminuindo os recursos naturais e aumentando a conscientização do consumidor sobre questões ambientais. Embora estejam alinhados, nenhum estudo enfoca simultaneamente a avaliação de prontidão e maturidade dos conceitos de inteligência e sustentabilidade. Os autores, de forma pioneira, propõem um novo modelo intitulado “*Smart and Sustainable Supply chain Readiness and Maturity model (S3RM)*” e o validaram, por meio da realização de um estudo de caso na indústria automotiva. Projetaram um modelo com base na abordagem *Triple-Bottom-Line (TBL)* que consiste em dimensões de inteligência e sustentabilidade.

No estudo apresentaram o TBL de inteligência cobrindo a subdimensão de disponibilidade, integridade e adaptabilidade. O TBL de sustentabilidade inclui aspectos sociais, ambientais, e subdimensões econômicas. O modelo proposto tem o cálculo de um Índice de Prontidão e Maturidade Inteligente e Sustentável pela média da soma dos pontos obtidos de sustentabilidade e da multiplicação dos pontos de inteligência.

Esse estudo oferece um guia para os gestores das cadeias de suprimentos inteligentes e sustentáveis. Cada subdimensão é composta por itens medidos por uma escala de prontidão e maturidade. Os resultados sugeriram como os itens de inteligência e sustentabilidade criam forças, fraquezas, oportunidades e ameaças para as operações da cadeia de suprimentos. O modelo forneceu implicações gerenciais na avaliação da prontidão e maturidade das ferramentas da Indústria 4.0 e indicadores de sustentabilidade.

Visaram desenvolver um modelo para avaliar a prontidão e a maturidade da cadeia de suprimentos inteligente e sustentável. A proposta foi o modelo S3RM como uma estrutura conceitual e uma ferramenta de medição que mescla TBL de sustentabilidade com TBL de inteligência. O TBL da sustentabilidade consiste em subdimensões sociais, ambientais e econômicas. TBL de inteligência identifica a digitalização do SCM. Essa dimensão inclui as subdimensões de disponibilidade, adaptabilidade e integridade. Juntamente com essas subdimensões, o TBL da terminologia *smartness* é a originalidade do estudo.

Esse estudo foi diferente dos anteriores por combinar tecnologias inteligentes e indicadores de sustentabilidade, componentes ponderados individualmente de um

modelo de prontidão e maturidade. Assim, o modelo mediu separadamente os índices de inteligência e sustentabilidade, determinando uma pontuação combinada de prontidão e maturidade e forneceu aos tomadores de decisão *insights* sobre o estado atual da empresa.

Os autores trouxeram uma dupla contribuição para a literatura. Primeiro, o modelo S3RM foi a primeira ferramenta de avaliação que mediu a prontidão e a maturidade de uma cadeia de suprimentos em termos de dimensões inteligentes e sustentáveis ao mesmo tempo. Além disso, TBL de inteligência foi a nova terminologia que adicionaram à literatura.

O Índice de Prontidão e Maturidade Inteligente e Sustentável, resultado numérico do modelo, é encontrado pelo cálculo das pontuações de sustentabilidade e inteligência. Essa pontuação do índice ajuda as empresas a identificarem, avaliarem seu estado atual de prontidão e maturidade da cadeia de suprimentos inteligente e sustentável e orienta os gerentes a identificarem decisões estratégicas para a direção futura. O modelo avalia a sustentabilidade de toda a empresa e uma capacidade tecnológica abrangente, avaliando simultaneamente as dimensões de inteligência e sustentabilidade. O estudo apresentou uma revisão detalhada da literatura sobre tecnologias de manufatura inteligente, cadeias de suprimentos sustentáveis e os modelos de prontidão e maturidade existentes na literatura. Além disso, o modelo S3RM é uma ferramenta amigável para identificar o estado atual de prontidão e maturidade da cadeia de suprimentos inteligente e sustentável de uma empresa.

2.2.12 Industry 4.0 and business policy development: strategic imperatives for SME performance

Autores: Govindarajo, N. S.; Kumar M, D.; Shaikh, E.; Kumar, M.; Kumar, P. 2021

Segundo os autores, a Indústria 4.0 apresenta às empresas novas perspectivas para renovar os processos de fabricação industrial e aumentar a criação de valor, além de uma promessa de novas estratégias de otimização para melhorar o desempenho dos negócios.

O objetivo dos autores foi examinar a relação entre a capacidade de inovação e a capacidade dos funcionários no desempenho organizacional entre empreendedores de indústrias de pequeno e médio porte.

O estudo abordou três (3) relações diretas e duas (2) indiretas no modelo. Após amostragem aleatória estratificada, que utilizou 384 empreendedores de PME's do estado de Selangor, na Malásia, o estudo aplicou o Smart PLS-SEM para analisar os dados. Os resultados mostraram a capacidade de inovação e a capacidade de os funcionários das PME's se correlacionam positivamente com o desempenho do negócio. O estudo também mostrou o efeito de mediação parcial da mudança de tecnologia na capacidade de inovação e no desempenho dos negócios e na capacidade dos funcionários e no desempenho dos negócios. A investigação estendeu as implicações práticas e teóricas às partes interessadas das PME's e das empresas.

Para os autores, a Indústria 4.0 tem implementado várias tendências de automação, troca de dados em tecnologias de serviço e produção. As PME's estão em um cenário repleto de informações e muitas vezes sem saber como devem atuar e por onde começar frente às mudanças tecnológicas com todos os novos recursos e capacidades disponíveis.

Os resultados do estudo prepararam melhores *briefings* práticos para os gerentes de linha e gerentes de pessoas das PME's em seu papel na formação de competências da força de trabalho e no desenvolvimento de capacidades de inovação, garantindo decisões estratégicas inovadoras e proativas. O estudo deixou obrigações estratégicas para os formuladores de políticas na elaboração de políticas industriais 4.0 sólidas para um melhor desempenho dos negócios (Govindarajo *et al.*, 2021).

2.2.13 Development of a digitalization maturity model for the manufacturing sector

Autores: Canetta, L.; Barni, a.; Montini, E. (2018)

Os autores propuseram descrever as ações estratégicas e tecnológicas para a digitalização total de uma organização, com uma visão abrangente que considere os conceitos que direcionem novos valores e alavanquem outras ações, processos e tecnologias facilitadoras. Analisaram as consequências que essa digitalização trará na

criação de um ambiente novo de trabalho, em que as equipes sofrerão um impacto por conta das exigências de novas competências com as mudanças nas tarefas desempenhadas dentro das organizações, da mesma forma, trará também consequências sociais na satisfação no trabalho, no equilíbrio entre a vida profissional e a pessoal, e nas novas formas de emprego.

O objetivo do estudo foi desenvolver uma ferramenta de avaliação para, de um lado, criar um instrumento de avaliação que possa fornecer uma análise descritiva da maturidade das empresas em relação à Indústria 4.0 e, por outro lado, permitir uma comparação com outras empresas de diferentes setores e estratégias de produção.

Para auxiliar nesse mapeamento, os autores desenvolveram um modelo de maturidade para avaliar o *status* atual de uma empresa no caminho em direção à Indústria 4.0. Consideraram as dimensões: Estratégia; Tecnologia; Produtos e Serviços; Processos e Pessoas.

O trabalho proposto forneceu uma análise sistemática dos estudos realizados no campo da pesquisa e industrial, para avaliar o atual nível de maturidade das indústrias no domínio da Indústria 4.0. A análise realizada foi tomada como *input* para o desenho de um quadro de avaliação que permitiu avaliar o impacto que a adoção das tecnologias e métodos da Indústria 4.0 tem na estrutura e nos colaboradores das empresas.

2.2.14 Readiness to face Industry 4.0

Autores: Maria, S.; Darma, D. C.; Amalia, S.; Hakim, Y. P.; Pusriadi, T. (2019)

Os autores buscaram realizar uma análise da influência das dimensões econômica, social, cultural, tecnológica e ambiental na prontidão da empresa PT. Jatim Watkoraya (Filial Samarinda) para a Indústria 4.0. Os dados foram processados usando o modelo *Partial Least Square* (PLS) e o programa SmartPLS 3.0. Baseado no tipo de investigação que foi descritivo e de verificação, o método de investigação utilizado foi o inquérito explicativo na PT. Jatim Watkoraya (Sucursal Samarinda) com 36 respondentes. Os resultados do estudo indicaram que as Dimensões Econômica e Ambiental confirmam relação positiva e significativa na Prontidão para a Indústria 4.0.

As Dimensões Cultural e Tecnológica têm um efeito positivo, mas não significativo, na Prontidão para implantação da Indústria 4.0. A Dimensão Social tem um efeito negativo e não significativo na Prontidão para a Indústria 4.0. Segundo os autores, a Quarta Revolução Industrial não pode ser enfrentada unicamente com o desenvolvimento tecnológico, mas há a necessidade de envolver as dimensões econômicas, sociais, culturais e ambientais também.

A pesquisa utilizou uma análise associativa com métodos quantitativos, ou seja, o tipo de pesquisa que testa a relação causal entre duas ou mais variáveis. A Variável Latente (VL) (construto exógeno) que é determinada foi a Dimensão Econômica, Social, Cultural, Tecnológica e Ambiental. Considerando que Variáveis Latentes são determinadas, ou seja, foi a Prontidão para Enfrentar a Indústria 4.0, e variáveis manifestas que consistiram em: (1) Eficiência e Eficácia da Produção; (2) Sistema de Valoração Econômica; (3) Bem-Estar do Empregado; (4) Expansão do Emprego; (5) Habilidades do Funcionário; (6) Recursos Humanos Baseados em *Soft Skills*; (7) Desenvolvimento de Recursos Humanos; (8) Capacidade e capacidade; (9) Características Pessoais; (10) Cultura Organizacional; (11) Acesso ao Mundo Amplo; (12) Liberdade de opinião; (13) Integração de Antecedentes Culturais; (14) Tecnologia de Digitalização; (15) Conectividade de Máquinas de Produção; (16) Velocidade da Tecnologia; (17) Tecnologia Ambientalmente Amigável; (18) Externalidades Ambientais; (19) Apoio ao Ambiente de Trabalho; (20) Assistência Técnica; (21) Decisões Descentralizadas; (22) Interconexão; e (23) Transparência da Informação.

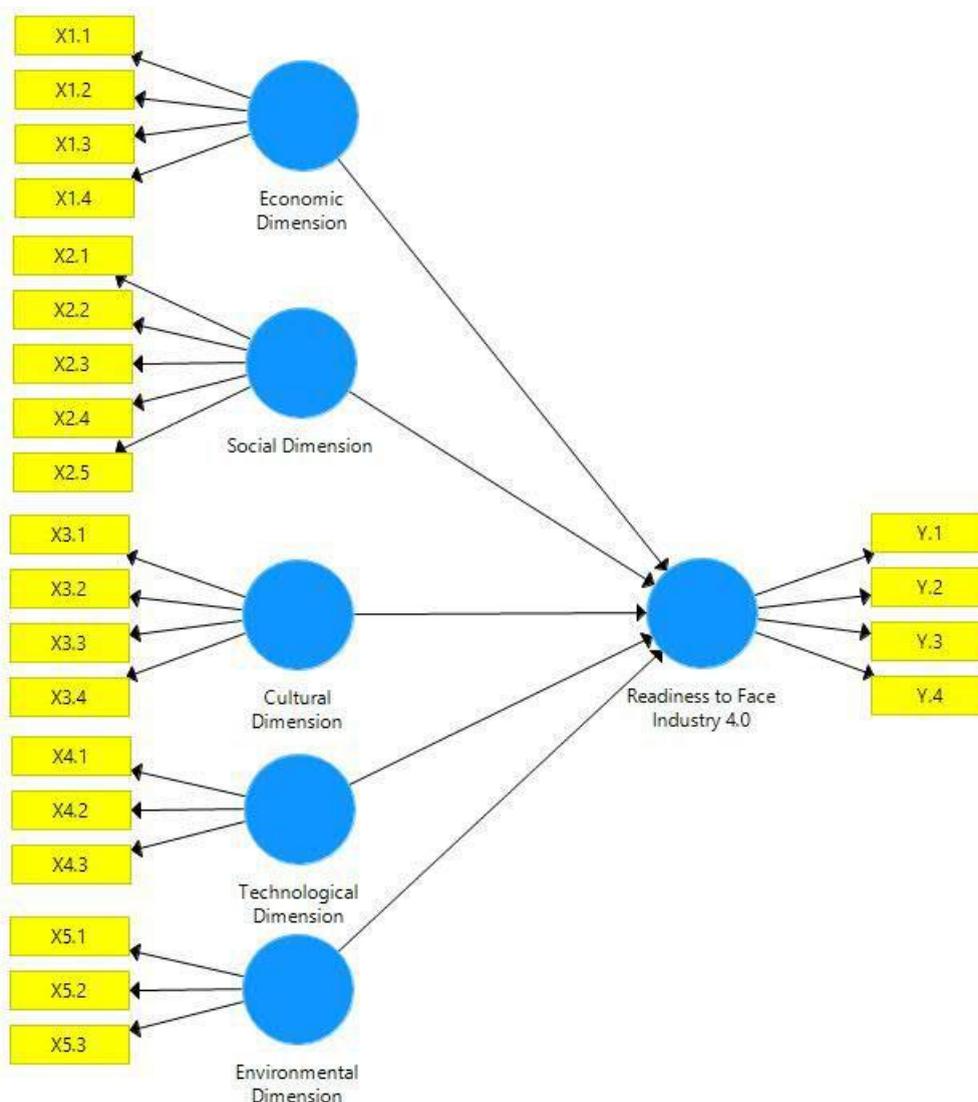
Para facilitar o estudo, a pesquisa foi simplificada em construtos variáveis, onde uma variável foi um atributo ou característica de um objeto ou atividade que tem certas variações definidas pelo pesquisador para estudar e tirar conclusões. Com base na formulação, objetivos, a relação entre o modelo de pesquisa e a hipótese proposta, os dados foram tratados usando o modelo PLS. Com base no tipo de pesquisa, o método de pesquisa utilizado foi o *survey* explicativo, com determinação de fontes de dados baseados em dados primários obtidos por meio de entrevistas diretamente por meio de questionários no campo. Com base nas necessidades de pesquisa, porque a população é inferior a 100 respondentes, os pesquisadores pegaram 100% da população no PT. Jatim Watokoraya (Ramo Samarinda) até 36 pessoas. Assim, a utilização de toda a população, sem necessidade de desenhar a amostra da pesquisa como uma unidade de observação, foi denominada como técnica de censo. A análise

de modelos estruturais em PLS foi realizada com 3 etapas: (1) Análise do modelo externo; (2) Análise de modelos internos; e (3) Teste de hipóteses. A análise do modelo externo foi feita para garantir que as medições usadas sejam viáveis para serem usadas como medidas (válidas e confiáveis).

A análise do modelo externo pode ser vista a partir dos indicadores: (1) Validade convergente; (2) Validade discriminante; e (3) Unidimensionalidade.

Para testar a hipótese, foram observados os valores de probabilidade e as estatísticas t. Para valores de probabilidade, o valor p com alfa 5% é menor que 0,05. O valor da tabela t para alfa 5% é 1,96. Assim, os critérios de aceitação da hipótese são quando estatísticas $t >$ tabela t. Enquanto isso, a análise do modelo interno/análise estrutural do modelo foi realizada para garantir que os modelos estruturais fossem robustos e precisos. A avaliação do modelo interno pode ser vista a partir de vários indicadores que incluem: (1) O coeficiente de determinação (R^2); (2) Relevância preditiva (Q^2); e (3) *Goodness of Fit Index* (O teste do modelo estrutural do PLS foi feito com a ajuda do Programa SmartPLS versão 3.0 para Windows por meio de 2 modelos testados, ou seja, o modelo de medição (modelo externo) e o modelo interno. O modelo estrutural completo pode ser examinado na Figura 7 a seguir.

Figura 7 - Construction of Research



Fonte: Maria *et al.* (2019, p. 2364).

Relativamente aos resultados da análise, foi possível tirar as seguintes conclusões: (1) A Dimensão Econômica e a Dimensão Ambiental confirmam uma relação positiva e significativa na Prontidão para Enfrentar a Indústria 4.0; (2) A Dimensão Cultural e a Dimensão Tecnológica têm uma relação positiva, mas não significativa na Prontidão para Enfrentar a Indústria 4.0; e (3) Dimensão Social tem relação negativa e não significativa na Prontidão para Enfrentar a Indústria 4.0. Os problemas que ocorrem hoje não podem ser resolvidos da mesma forma que no conceito passado. A Revolução Industrial 4.0 não pode ser enfrentada apenas com o desenvolvimento tecnológico, sem envolver nele dinâmicas econômicas, sociais,

culturais e ambientais. Além de preparar uma competitividade superior, a PT. Jatim Watkoraya (Sucursal Samarinda) precisa desenvolver consciência e maturidade dos recursos dos funcionários para abordar o desenvolvimento do mundo de hoje, especialmente na era da pós-verdade, quando as informações fluem profusamente sem clareza da verdade. É preciso formular a estratégia política interna da empresa por meio da conscientização e maturidade de pensamento. Diante da revolução industrial 4.0, os pesquisadores argumentam que existem dois caminhos que são percorridos: (1) PT. Jatim Watkoraya (Sucursal Samarinda) prepara a implementação de um programa baseado na ligação e adequação entre os recursos humanos e as necessidades atuais; e (2) Revitalizar os recursos humanos da empresa por meio de valores humanos que são ensinados pela função de humanidades sociais. Quando as ciências exatas desempenham um papel no desenvolvimento da tecnologia empírica, a ciência ainda desempenha um papel na manutenção da qualidade humana (software/usuários). Se isso acontecer, o avanço da tecnologia como filho biológico pode ter um impacto positivo na sustentabilidade da empresa, dos trabalhadores e do meio ambiente.

2.2.15 Industry 4.0 maturity models: review and classification as a support for Industry 4.0 implementation

Autores: Walter, O. M. F. C.; Paladini, E. P.; Henning, E.; Konrath, A. C. (2020)

O objetivo dos autores foi identificar e discutir os modelos de maturidade da Indústria 4.0 disponíveis na literatura, com base nas dimensões desses modelos, bem como o nível de maturidade que eles podem medir.

Para os autores, a Indústria 4.0 é considerada uma importante tendência atual e muitas empresas estão cientes de seu conceito e do impulso que essa tecnologia pode proporcionar ao modelo de negócios da empresa. No entanto, muitas empresas ainda não sabem o ponto de partida para implementar essa tecnologia. Nesse sentido, a análise de modelos de maturidade busca apoiar as indústrias na implementação com uma ferramenta visual que possa guiá-las rumo à implantação da Indústria 4.0.

O artigo também identificou os pontos fracos e outros problemas dessas abordagens e, com base nesse resultado, faz recomendações para um modelo de maturidade da Indústria 4.0 melhor, mais adequado e abrangente.

Realizaram uma revisão sistemática da literatura com 14 modelos de maturidade da Indústria 4.0 publicados em periódicos revisados por pares, conferências e relatórios de consultoria. As características do modelo de maturidade da Indústria 4.0 foram agrupadas em alguns parâmetros como: dimensões, níveis de classificação, se desenvolvido por método científico ou consultoria.

Para os autores, os resultados demonstraram que as pesquisas sobre o tema estão em início de desenvolvimento, os modelos de maturidade da Indústria 4.0 desenvolvidos em parceria com universidades e consultorias são mais robustos porque suas dimensões abrangem uma gama maior de aspectos quando comparado aos modelos de maturidade da Indústria 4.0 de base acadêmica, além da não existência de um método comum em termos de escopo, dimensões, medições e indicadores.

Nesse estudo foram estabelecidos alguns parâmetros para a revisão dos modelos de maturidade da Indústria 4.0, que foram classificados em modelos de maturidade “Baseado em acadêmico”, “Baseado em consultor” e “Baseado em consultor e acadêmico”, “Verificado” ou “Não verificado”; Modelos de maturidade; esses 14 modelos de maturidade também foram classificados como nível de maturidade quantitativo ou qualitativo.

Os principais modelos de maturidade da Indústria 4.0 apresentam níveis de maturidade qualitativos e não revelam como eles desenvolvem os níveis de maturidade apresentados. Os autores demonstraram que o desenvolvimento dos modelos de maturidade da Indústria 4.0 está em um estágio inicial de desenvolvimento e os modelos de maturidade da Indústria 4.0 “de base acadêmica” precisam ser aprimorados, considerando dimensões mais amplas e mais específicas. Embora os modelos de maturidade da Indústria 4.0 baseados em acadêmicos e consultores sejam mais robustos porque suas dimensões cobrem uma gama maior de aspectos quando comparados aos modelos de maturidade da Indústria 4.0 baseados em acadêmicos, nenhum deles foi verificado por meio de aplicações práticas e estudos

empíricos. Isso pode ser apontado como um ponto fraco desses modelos de maturidade da Indústria 4.0.

A pesquisa também identificou que não existe um método comum na área em termos de escopo, dimensões, medições e indicadores. Assim, fica difícil comparar empresas para saber qual empresa está melhor posicionada na maturidade do setor 4.0.

Colocam alguns tópicos que podem ser abordados em trabalhos futuros:

- Aprofundar nos clusters de dimensões do modelo de maturidade da Indústria 4.0 e explorar o que eles avaliam;
- Explorar os resultados da avaliação dos modelos de maturidade da Indústria 4.0 estudados;
- Desenvolver um modelo completo de maturidade da Indústria 4.0 com dimensões e soluções abrangentes para solucionar as necessidades da Indústria 4.0 e não apenas classificar as empresas em níveis de maturidade no contexto da Indústria 4.0.

2.2.16 Intelligent transformation of the manufacturing industry for Industry 4.0: seizing financial benefits from supply chain relationship capital through enterprise green management (2021)

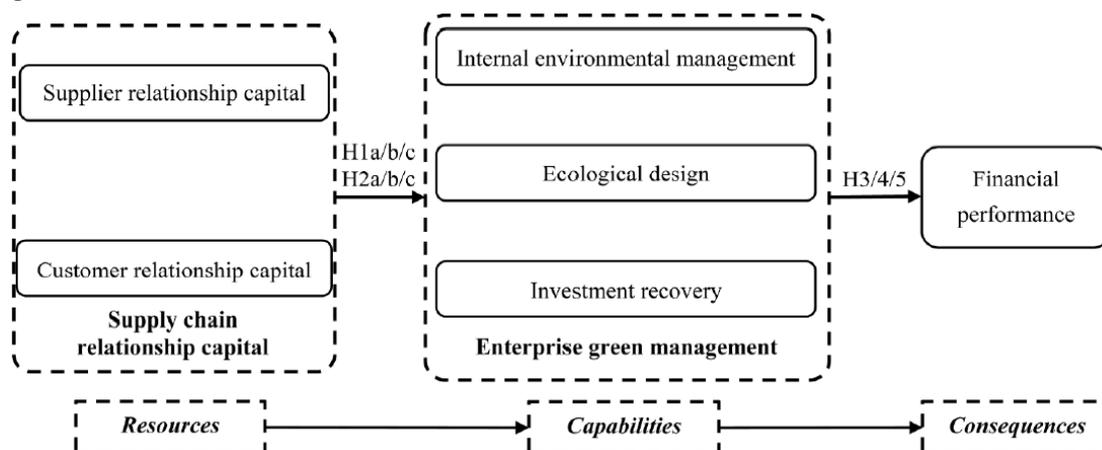
Autores: Yu, Y.; Zhang, J. Z.; Cao, Y.; Kazancoglu, Y.

Segundo os autores, ainda não está claro como os fatores sociais e ambientais podem melhorar o desempenho das empresas em sua transformação digital na Indústria 4.0. Realizaram uma pesquisa que buscou abordar essa lacuna explorando como as empresas em transformação digital podem alavancar seu capital de relacionamento e iniciativas de gestão verde para melhorar seu desempenho financeiro e beneficiar toda a cadeia de suprimentos.

Desenvolveram um modelo conceitual para capturar a relação entre capital do relacionamento da cadeia de suprimentos, gestão verde e desempenho financeiro. Utilizaram uma modelagem de equações estruturais e SPSS PROCESS para testar

empiricamente as hipóteses com dados coletados de 308 empresas manufatureiras chinesas.

Figura 8 - Modelo Conceitual



Fonte: Yu *et al.* (2021, p. 4).

Os resultados indicaram que, para as empresas na transformação digital da Indústria 4.0, o capital de relacionamento da cadeia de suprimentos afeta positivamente a gestão verde da empresa, o que posteriormente melhora o desempenho financeiro. Além disso, o capital de relacionamento da cadeia de suprimentos também melhora indiretamente o desempenho financeiro das empresas, alavancando suas iniciativas de gestão verde.

Esses resultados contribuíram para a literatura ao enriquecer as implicações do capital relacional nas cadeias de suprimentos e fortalecer a viabilidade da gestão verde. Também fornece uma orientação prática para as empresas implementarem efetivamente programas de gestão verde e explorarem seu capital de relacionamento.

2.3 Maturidade e prontidão tecnológica: uma análise dos artigos apresentados

Hajoary (2020) e Demir *et al.* (2022) apresentam estudos relacionados à implantação e desenvolvimento dos conceitos da Indústria 4.0 nas empresas. Apresentam modelos de maturidade e de prontidão, que são ferramentas para

compreender o grau de evolução e implementação nas empresas com as novas tecnologias demandadas à Quarta Revolução Industrial.

Autores como Cerezo-Narvaez, Otero-Mateo e Pastor-Fernandez (2017); Rehman, Au Yong e Choong (2021); Govindarajo *et al.* (2021) e Nguyen e Luu (2020) apresentaram em seus estudos como as competências profissionais influenciam a transformação digital rumo à Indústria4.0.

Yu *et al.* (2021) verificaram que o capital de relacionamento da cadeia de suprimentos afeta positivamente a gestão verde da empresa e em um segundo momento melhora o desempenho financeiro.

Os artigos de Caiado *et al.* (2021); Silva e Rocha (2020); Schumacher, Erol e Sihn (2016); Veza, Mladineo e Peko (2015); De Carolis *et al.* (2017); Canetta, Barni e Montini (2018) e Walter *et al.* (2020) apresentaram modelos de maturidade que ajudam a alcançar estágios mais elevados e relacionam cultura, colaboradores, processos, infraestruturas, objetos e TÍ's. Já Vrchota e Pech (2019) e Maria *et al.* (2019) apresentaram modelos de prontidão tecnológica.

Verificou-se uma predominância, nos trabalhos pesquisados, de modelos de maturidade das empresas sobre os modelos de prontidão tecnológica. Isso pode ter ocorrido por haver um entendimento de que a maturidade seja algo que engloba a prontidão. Segundo Hajoary (2022), a noção de prontidão é encapsulada com a ideia de maturidade.

Um modelo de maturidade pode ser considerado um padrão de competência que aponta diferentes graus de maturidade. Um dos objetivos desse modelo é avaliar em que medida uma competência da organização atende aos critérios de exigência de qualidade definidos por um determinado padrão. Devem ser considerados os requisitos necessários exigidos, com confiabilidade e validade dos dados, sendo a consistência, a replicação e a eficiência os requisitos adicionais para atingir tais objetivos (Jochem; Geers; Heinze, 2011).

O termo maturidade implica algum progresso de desenvolvimento de um sistema. Conseqüentemente, sistemas em maturação (biológicos, organizacionais ou tecnológicos) aumentam suas capacidades com o passar do tempo e em relação à obtenção de algum estado futuro desejável. A maturidade pode ser capturada

qualitativa ou quantitativamente de forma discreta ou contínua (Kohlegger; Maier; Thalmann, 2009).

Entende-se que a maturidade de um produto ou serviço, ao longo do tempo, com o seu desenvolvimento, passa de um estágio inicial ou de pouca maturidade para um mais avançado ou de maior maturidade. Dessa forma, um modelo de maturidade, na busca pela melhoria do produto e seu consequente estágio final, pode ser visto em uma estrutura com vários níveis, os quais devem cumprir alguns critérios específicos para se alcançar e atingir o próximo nível (Jochem; Geers; Heinze, 2011).

Os modelos de maturidade são instrumentos que podem ser utilizados na classificação das capacidades de itens em amadurecer e selecionar ações que sejam adequadas para os elementos atingirem um patamar mais alto de amadurecimento. Suas áreas de aplicação são amplas e variam de ciência cognitiva a aplicações de negócios e engenharia. Embora existam muitos modelos de maturidade encontrados nas literaturas científica e não científica, o desenvolvimento de um modelo de maturidade é ainda, em sua maioria, inexplorado (Kohlegger; Maier; Thalmann, 2009).

Modelos de maturidade são comumente utilizados como um instrumento para conceituar e medir a maturidade em uma organização ou em um processo com relação a algum estado específico que se deseja atingir. Os modelos de prontidão, adotados como sinônimos, têm o objetivo de capturar o ponto de partida e permitir a inicialização do processo de desenvolvimento (Schumacher; Erol; Sih, 2016). Os autores entendem a diferença entre a prontidão e a maturidade, uma vez que a avaliação da prontidão é anterior ao processo de amadurecimento. Já a avaliação da maturidade busca obter o estado tal como está durante o processo de amadurecimento.

Acredita-se que a melhoria de processos deva ser realizada passo a passo. Somente focando na melhoria de processos pode-se melhorar a maturidade organizacional e a qualidade do produto (Tang, 2019).

Em gestão de projetos, a maturidade é definida como sendo o desenvolvimento de sistemas e processos de natureza repetitiva e busca atingir um patamar em que as ações de gestão e controle sejam "institucionalizadas" na empresa. Esse desenvolvimento não irá garantir o sucesso, mas ao menos uma maior probabilidade (Jucá Junior; Conforto; Amaral, 2010).

Um modelo de maturidade tem por objetivo medir o estágio em que se encontram as empresas na gestão de seus projetos e indicar caminhos para a melhoria desse estágio. Acredita-se no papel de orientação que os modelos de maturidade assumem na qualificação dos serviços, adquirindo características de diagnóstico. Assim sendo, níveis de maturidade maiores resultarão em uma maior rentabilidade e um desempenho melhor.

De outro lado, Pacchini *et al.* (2019) propuseram um modelo para medir o grau de prontidão de uma empresa de manufatura para implementação da Indústria 4.0. Alguns modelos foram propostos no passado para determinar o grau de maturidade de uma empresa que mede o progresso feito pela empresa na implementação da Indústria 4.0. Segundo os autores, embora anteriormente ocorreram propostas para determinar o grau de maturidade de uma organização na implementação da Indústria 4.0, não foi ainda proposto nenhum modelo que determinasse o grau de prontidão de uma empresa, o que no entendimento dos mesmos é uma fase anterior ao processo de amadurecimento.

O modelo que apresentaram possui oito capacitadores de tecnologia que são relevantes de acordo com a literatura estudada. As oito tecnologias facilitadoras são: Sistemas Ciber Físicos, Internet das Coisas, Computação em Nuvem, Big Data, Realidade Aumentada, Robôs colaborativos, Manufatura Aditiva e Inteligência Artificial (Pacchini *et al.*, 2019).

Os modelos de prontidão são conceitos que analisam um estado atual dos recursos, condições e atitudes, em todos os setores e níveis de processos que sejam necessários para alcançar um determinado objetivo (Mittal *et al.*, 2018).

Os modelos de prontidão são uma ferramenta importante para avaliar as capacidades atuais e definir diretrizes de aperfeiçoamento para o futuro da organização (Schumacher *et al.*, 2016).

No questionário desenvolvido por Vrchota e Pech (2019), 16 variáveis foram consideradas para caracterizar as diferentes tecnologias da Indústria 4.0, usadas para verificar a Prontidão Tecnológica das organizações: coleta de dados, armazenamento em nuvem, análise de dados, infraestrutura de TI, sistemas de informação, M2M, robôs, terminais móveis, uso de sensores, software de aprendizagem,

compartilhamento de dados, realidade virtual, manufatura aditiva, ou seja, impressão 3D, nanotecnologia, drones e veículos autônomos.

Maturidade e prontidão são termos distintos, mas explicam a mesma entidade e são utilizados de forma complementar para descrever o mesmo conceito (Schumacher *et al.*, 2016). Mas não são mutuamente exclusivos, de acordo com De Carolis *et al.* (2017), os termos prontidão e maturidade são relativamente relacionados.

Segundo Hajoary (2022), o conceito de modelo de prontidão da Indústria 4.0 foi derivado do conceito de modelo de maturidade de capacidade (CMMI) e, a partir de então, muitos profissionais, líderes da indústria e pesquisadores utilizaram a estrutura desse modelo para projetar novos modelos de prontidão e maturidade da Indústria 4.0 para avaliar e analisar as organizações de manufatura em direção à Quarta Revolução Industrial.

Nota-se uma diferença conceitual quando se trata da maturidade de uma organização e a prontidão tecnológica de uma empresa, pois entende-se que a maturidade é um estado em que se encontra a organização, que pode até ser considerada de maturidade nula, ou baixa, média ou alta, enquanto a prontidão tecnológica está mais relacionada a possuir ou não recursos e condições para “estar pronta” para as mudanças que se desejam.

Segundo Hajoary (2020), para entender o cenário atual e os níveis de desempenho que se deseja atingir de uma organização, deve-se avaliar, inicialmente, o nível de maturidade e prontidão tecnológica em busca de proporcionar diretrizes detalhadas de implementação para a Indústria 4.0.

Para Demir *et al.* (2022), os modelos de prontidão e maturidade são ferramentas indispensáveis para avaliar as capacidades de manufatura inteligente de uma empresa, pois auxiliam as empresas a explorarem a prontidão e a maturidade digital, reconhecerem suas fraquezas e ajustarem de forma ampla seus processos com *smart factory*. A Indústria 4.0 é uma mudança de conceito nas tarefas operacionais da cadeia de suprimentos, que abrange novas tecnologias, como Internet das Coisas, inteligência artificial, sistemas robóticos, tecnologia de computação em nuvem, redes de sensores e automação, veículos autônomos, realidade virtual e aumentada, entre outras. Para os autores, essa mudança traz questões de seus possíveis efeitos na sustentabilidade na cadeia de suprimentos. Portanto, o impacto

da transformação digital que se observa em todas as atividades dessa área não pode ser visto e analisado de forma separada do impacto social, de atributos ambientais e da sustentabilidade econômica. Tal abordagem deve avaliar a inteligência e a sustentabilidade das cadeias de suprimentos por meio de um modelo que represente o nível de prontidão e maturidade das organizações.

A implementação da Indústria 4.0 no Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos, ou *Supply Chain Management* (SCM) trará melhores resultados e controles de monitoramento do estoque em tempo real. As redes da cadeia de suprimentos são integradas em uma plataforma, de ponta a ponta, desde o fornecedor até os clientes. O sistema ciberfísico possibilitará um monitoramento remoto, ajudará a manter uma forte rede de segurança e manutenção preditiva da integridade dos sistemas. Nos dias de hoje, os produtos são produzidos conforme as necessidades dos clientes, customizados, e as tecnologias como sensores e RFID poderão ser usadas para rastrear a qualidade, localização e *status* (Hajoary, 2020).

Para Hofmann *et al.* (2019), em essência, a I4.0 permitirá uma automação de bens e serviços, na cadeia de suprimentos, quase sem interferência humana. Uma troca de dados de tecnologias e processos de fabricação que incluirão, entre outros, CPS, IoT, computação em nuvem, e IA. A tomada de decisão será predominantemente descentralizada e os elementos do sistema, como fábricas ou veículos de transporte, tomarão decisões autônomas e direcionadas. Uma empresa de manufatura digital não estará apenas interconectada, mas também se comunicará, analisará e utilizará informações para conduzir ações inteligentes de volta ao mundo físico.

A Indústria 4.0 mudará a forma como as cadeias de suprimentos são projetadas e operadas atualmente. Referem-se ao SCM na nova era da Indústria 4.0 como “SCM 4.0”. Representará uma nova fase de desenvolvimento do SCM, em que a coordenação de materiais, informações e fluxos financeiros nas redes das organizações será amplamente automatizada com o uso de tecnologias digitais (Hofmann *et al.*, 2019).

Chauhan e Singh (2020) avaliaram como o tema emergente da Indústria 4.0 é considerado no contexto do SCM e identificaram áreas importantes para pesquisas futuras. Realizaram uma revisão sistemática da literatura com 334 estudos e analisaram, com foco nos métodos de pesquisa utilizados, os principais temas

abordados e como o assunto evoluiu com o tempo. Descobriram que até agora os estudiosos se concentraram em princípios e práticas para SCM digitalizado, identificaram facilitadores e barreiras e consideraram a Indústria 4.0 em vários níveis, particularmente no nível da empresa. Notaram que a maioria dos estudos se concentrou na área da manufatura das empresas.

Estudos indicam que as empresas estão caminhando para a Indústria 4.0 para obter maior eficiência de processos e competitividade. Essas mudanças abrangem toda a cadeia de suprimentos e são marcadas por avanços tecnológicos disruptivos que estão rompendo as fronteiras entre o mundo físico e o virtual (Chauhan; Singh, 2020).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A proposta de metodologia deste estudo constituiu-se na aplicação de uma pesquisa de campo quantitativa, do tipo descritiva e explicativa, por meio de um modelo, com um questionário aplicado a gestores, administradores e profissionais de TI de empresas de manufatura. Depois, os dados foram coletados no *Google Forms* e, posteriormente, foram analisados com auxílio do software SmartPLS versão 4 para apresentação dos resultados.

O método é definido pelas estratégias adotadas para uma produção científica, compreendendo e analisando os dados com o objetivo de confirmar ou debater alguma teoria existente. O estudo é visto como uma pesquisa de investigação, coleta e análise de dados estruturados por meio de um método (Silva *et al.*, 2015).

O experimento, a pesquisa levantamento (*survey*) e a modelagem e simulação são os métodos quantitativos de pesquisa mais relevantes. Já os métodos qualitativos de pesquisa mais importantes são o estudo de caso, a pesquisa-ação e o *soft system methodology*. A entrevista, o questionário, a leitura de documentos, a observação, entre outras são algumas das técnicas de pesquisa que podem ser empregadas muitas delas de forma concomitante em um desses métodos (Turroni; Mello, 2012).

Como parte da metodologia deste trabalho, primeiramente, desenvolveu-se um modelo de maturidade para identificar e analisar os fatores associados à implantação da Indústria 4.0 e a relação com a prontidão tecnológica. A partir de outros modelos apresentados no Referencial Teórico deste trabalho, as dimensões e seus indicadores foram validados por meio de entrevistas com especialistas – profissionais de empresas de manufatura e com professores doutores universitários a respeito dos modelos de prontidão tecnológica e maturidade existentes e suas respectivas características e dimensões. Essas entrevistas abordaram as exigências e pré-requisitos atuais para organizações de manufatura.

Buscou-se realizar a aplicação do modelo para um conjunto de empresas de manufatura. Foram utilizadas algumas fontes para a definição da quantidade de empresas, bem como a obtenção de uma amostra delas. Foram levantados dados com os participantes no *Expert Training – Certificação Internacional em Indústria 4.0* no Brasil, realizado de 16 a 18 de maio de 2023 no Instituto Mauá de Tecnologia (IMT)

e no evento MetalIndústria em 30 de novembro de 2023, também no IMT, além de contatos junto a profissionais das indústrias. Tentou-se obter respostas junto às empresas filiadas à FIESP, mas infelizmente esta não autorizou a pesquisa.

A análise quantitativa ou qualitativa de dados coletados e de argumentos obtidos possibilita a aceitação ou rejeição de hipóteses e da estruturação de uma nova teoria ou conhecimento cientificamente comprovado (Salomon, 2004).

Para alcançar os objetivos deste trabalho, este estudo realizou uma análise dos dados obtidos por meio de uma modelagem de equações estruturais, a fim de poder analisar os dados e desenvolver as considerações finais e também servir de apoio para estudos futuros. A seguir apresenta-se o modelo a ser testado.

3.1 Dimensões e indicadores do modelo de maturidade das empresas para implantação da Indústria 4.0

No modelo de Vrchota e Pech (2019), as principais limitações do questionário foram em termos de desconhecimento do material e da terminologia por parte dos respondentes. Além de não incluir algumas aplicações específicas da Indústria 4.0, como o uso de drones, impressoras 3D, nanotecnologia e veículos autônomos. A coleta de dados foi aplicada somente a empresas que operam na República Tcheca.

O trabalho de Veza, Mladineo e Peko (2015) foi totalmente apoiado pela *Croatian Science Foundation* no âmbito do projeto *Innovative Smart Enterprise - INSENT* (1353).

Schumacher, Erol e Sihm (2016) apresentam outros modelos de maturidade, como da PricewaterhouseCoopers, da Rockwell automação e o modelo IMPULS – *Industrie 4.0 Readiness*” da VDMA, RWTH Aachen. Esses modelos são comumente utilizados como um instrumento para conceituar e medir a maturidade de uma organização ou um processo em relação a algum estado-alvo específico.

Verificou-se que o modelo IMPULS, desenvolvido por Lichtblau *et al.* (2015) e adotado por Silva e Rocha (2020), é cientificamente bem fundamentado e que seus resultados são explicados de maneira transparente (Schumacher; Erol; Sihm, 2016).

No modelo de Silva e Rocha (2020), foi possível verificar o nível de maturidade para a implantação da Indústria 4.0, onde a empresa é categorizada em recém-chegada, aprendiz ou líder, conforme Quadro 8. Segundo os autores, a pesquisa buscou contribuir no desenvolvimento de um modelo que possa ser utilizado em empresas dos mais diferentes setores e fornecer um instrumento de análise da maturidade para a Quarta Revolução Industrial.

Schumacher, Erol e Sihn (2016) reconheceram que o desenvolvimento do modelo de prontidão “IMPULS - Industrie 4.0 Readiness” é baseado em um conjunto de dados abrangente e detalhadamente com as dimensões, itens e a abordagem de avaliação oferecidos. O modelo está com boa base científica e sua estrutura e resultados são explicados de forma transparente, enquanto outras abordagens avaliadas oferecem menos detalhes sobre o processo de desenvolvimento, estrutura e metodologia de avaliação e, portanto, sem base para uma comparação detalhada, além de outros modelos e ferramentas que não oferecem quaisquer detalhes sobre a estrutura e conteúdo e que, portanto, não foram estudados.

No modelo de Carolis *et al.* (2017), a prontidão digital de uma empresa de manufatura é definida por meio de uma escala de níveis de maturidade. Esses níveis descrevem um conjunto adequado de recursos da empresa que são capazes de fornecer um retrato do atual momento de suas habilidades. Os níveis de prontidão digital são baseados nos princípios do *framework* CMMI. Esse modelo fornece uma estrutura definida de níveis de maturidade, especificando quais capacidades uma empresa possui em cada nível organizacional.

Verificou-se que os modelos apresentados avaliam o nível de maturidade das empresas em áreas diferentes, denominadas dimensões. Cada dimensão é definida por vários recursos de mudança e transformação. A maturidade da organização do setor 4.0 é descrita avaliando-se o nível de cada item de transformação e, dessa forma, de cada dimensão.

Os modelos analisados neste trabalho são baseados nos principais conceitos e nas principais tecnologias que auxiliam na implantação da Indústria 4.0. Esses modelos destacam que essas tecnologias aplicadas ao ambiente industrial são capazes de gerar transformações relevantes na competitividade das empresas, na

possibilidade de criar novas oportunidades de negócios e no desempenho organizacional.

Esses modelos abrangem as principais áreas da estrutura das organizações e consideram decisões estratégicas, pessoas, processos, manufatura e processos, TI, produtos inteligentes e serviços orientados por dados de acordo com a revisão da literatura.

De acordo com Schumacher, Erol e Sihn (2016), modelos de maturidade são desenvolvidos como ferramentas que visam identificar, em termos de maturidade, em que nível uma organização ou processo está posicionado e comparar com um nível desejado e modelos de prontidão buscam esclarecer se uma empresa está pronta para começar um processo de desenvolvimento. Entende-se com isso que, quanto mais pronta a empresa se encontra para iniciar um processo de desenvolvimento, maior será o nível de maturidade da organização.

Os resultados do estudo de Govindarajo *et al.* (2021) estabeleceram uma forte relação entre as variáveis independentes (capacidade do funcionário, capacidade de inovação e mudança de tecnologia) e a variável dependente (desempenho organizacional), explicando o impacto da disrupção tecnológica no desempenho organizacional das PME's na Malásia.

A seguir apresentam-se os indicadores e as dimensões definidas para o modelo de maturidade das empresas de manufatura no contexto da Indústria 4.0. Buscou-se realizar uma análise desses itens essenciais utilizados pelos autores nos modelos de prontidão tecnológica e maturidade avaliados, para verificar o atual *status* das empresas em questão à Indústria 4.0. Descreve-se também a importância e o papel das dimensões do modelo de maturidade na adoção e implantação desse novo conceito acerca da Quarta Revolução Industrial.

3.1.1 Estratégia e Organização (EO)

A Quarta Revolução Industrial pretende oferecer a oportunidade do desenvolvimento de novos modelos de negócios, com a finalidade de aumentar a competitividade e a produtividade, além disso, almeja melhorar seus produtos ou

processos existentes por meio do uso de avançadas tecnologias digitais. Para tanto, uma adequada implantação é fundamental na estratégia das empresas (Silva; Rocha, 2020).

Para Hajoary (2020), o sucesso da implantação da Indústria 4.0 em uma empresa precisa da conscientização e capacidade da equipe de gestão para realizar decisões estratégicas em relação às ações a serem tomadas neste momento. Os gestores devem entender o valor da Quarta Revolução Industrial, priorizar e alinhar com a estratégia dos negócios da empresa.

Para uma implantação da Indústria 4.0 com sucesso, deve-se, inicialmente, definir uma estratégia e avaliar o *status* em que a empresa se encontra quanto ao grau de implantação da Indústria 4.0; em sequência, priorizar e avaliar as necessidades futuras de acordo com as metas organizacionais, implementando indicadores de desempenho em todos os níveis da organização; estabelecer grupos de colaboradores da empresa para desenvolver projetos piloto para a implantação das tecnologias da Quarta Revolução Industrial; criar uma cultura de processos inteligentes com sistemas digitais e de novos modelos de negócios; e, finalmente, investir em recursos imprescindíveis para essa implantação, os quais se alinhem à estratégia de tecnologia da organização.

No modelo de Silva e Rocha (2020), foram analisados três (3) critérios: o *status* da estratégia de implantação, a operacionalização e revisão da estratégia por meio de um sistema de indicadores e a quantidade de investimentos.

Para o modelo deste trabalho definiu-se como sendo a Dimensão 1: Estratégia e Organização (EO), sendo definida pelos indicadores:

iEO1 – conscientização da importância e conhecimento sobre a Indústria 4.0 pelos gestores da organização;

iEO2 - definição de um plano estratégico para a implantação da Indústria 4.0;

iEO3 - utilização de um sistema de indicadores para medir o *status* de implantação da Indústria 4.0;

iEO4 - valor de investimentos.

3.1.2 Qualificação dos Funcionários (QF)

Os funcionários são os colaboradores das organizações para a implantação da Indústria 4.0, que também são os mais atingidos pelas transformações oriundas dessa mudança nos processos, pelas novas exigências de outras habilidades e conhecimentos, mostrando que essas organizações precisam procurar e preparar seus colaboradores para essas mudanças com treinamento apropriado e educação continuada (Lichtblau *et al.*, 2015).

Os funcionários são um ativo fundamental para a organização. É essencial que as organizações compreendam os conjuntos de habilidades, funções e qualificações atuais de seus colaboradores e os capacitem com as novas habilidades de acordo com os requisitos da Quarta Revolução Industrial. Outro aspecto a ser considerado é a capacidade de mudar a mentalidade desses colaboradores e a vontade de se atualizar. Assim, o sucesso da implantação da Indústria 4.0 dependerá da capacidade de os funcionários adotarem tecnologias digitais e de se adaptarem ao ambiente em mudança. A automação substituirá a maioria dos trabalhos manuais e novas funções serão criadas de acordo com as necessidades de negócios. Pensar de forma crítica, aprender novas habilidades e compreender as necessidades serão aspectos fundamentais para os colaboradores no contexto atual e futuro (Hajoary, 2020).

Na pesquisa desenvolvida por Vrchota e Pech (2019), Capacidade de Pessoas também foi uma das 17 variáveis consideradas para caracterizar a Indústria 4.0 das empresas.

Para o modelo deste trabalho, definiu-se como sendo a Dimensão 2: Qualificação dos Funcionários (QF), sendo definida pelos indicadores:

iQF1 – nível de qualificação dos funcionários na área de TI;

iQF2 - nível de qualificação dos funcionários na área de Análise de Dados;

iQF3 - nível de qualificação dos funcionários na área de desenvolvimento de software ou aplicação de sistemas de suporte;

iQF4 - nível de qualificação dos funcionários na área de segurança de informações e comunicações.

3.1.3 Manufatura e Processos Inteligentes (MPI)

O processo de fabricação tradicional era rígido e manual. No entanto, a Indústria 4.0 trouxe uma mudança drástica no processo de fabricação, transformando-o em um processo de fabricação mais ágil e automatizado. Assim, as organizações precisam transformar os processos atuais em processos de fabricação mais dinâmicos e ágeis. As métricas de sucesso de cada negócio dependerão da obtenção de baixo custo-eficácia ao mesmo tempo em que se executa um alto retorno sobre o investimento. Nesse cenário, as indústrias precisam investir em automação, adotar tecnologias da Indústria 4.0 e reduzir custos de mão de obra com a implementação de robôs no processo de fabricação. Também é igualmente importante avaliar os recursos atuais do processo de fabricação e implementar a virtualização dos processos de trabalho usando realidade aumentada, monitoramento de fábrica virtual, manutenção preditiva e troca de informações e dados com a ajuda da computação em nuvem (Hajoary, 2020).

Uma fábrica inteligente refere-se à interconectividade com o ciclo de vida do produto e com toda a cadeia de valor. A manufatura automatizada possui um ambiente de produção em que os sistemas de produção e logísticos se organizam amplamente sem intervenção humana. Conta com CPS que conectam os ambientes físico e virtual por meio de uma infraestrutura de TI e a IoT. Para tanto, requer a comunicação em tempo real entre empresas, sistemas de produção, de informação e pessoas (Silva; Rocha, 2020).

As organizações de manufatura podem desejar produzir produtos de forma autônoma em um ambiente de auto-otimização. A fabricação e suas operações formam a base e são consideradas o ponto central da Indústria 4.0. Uma produção com operações habilitadas para IoT se conecta via M2M para otimizar e prever utilizando-se de dados gerados e coletados dos processos. Dessa forma, as empresas necessitam avaliar o nível atual e o nível desejável futuro de automação em termos de processos, manuseio de materiais, descentralização, capacidade de modelagem e simulação digital, desenvolvimento de produtos, manutenção preventiva, e inteligência artificial (Hajoary, 2020).

As operações inteligentes referem-se à integração da empresa como um todo, permitindo um controle flexível da produção e de um melhor planejamento (Silva; Rocha, 2020).

A inclusão de novas abordagens nos sistemas de planejamento de produção e no gerenciamento da cadeia de suprimentos está sendo possível com o avanço da digitalização. As operações e/ou os processos inteligentes são os requisitos técnicos necessários para esses sistemas obterem um autocontrole das peças e, com isso, a integração dos sistemas produtivos poderá aumentar a flexibilidade, a qualidade e a produtividade nas empresas de manufatura.

Para o modelo deste trabalho definiu-se como sendo a Dimensão 3: Manufatura e Processos Inteligentes (MPI), sendo definida pelos indicadores:

iMPI1 – atual infraestrutura de equipamentos;

iMPI2 – processos autônomos;

iMPI3 – utilização de CPS;

iMPI4 – utilização de IoT.

3.1.4 Tecnologia da Informação (TI)

A TI surgiu com o advento dos computadores e a invenção da rede mundial de computadores em 1989. Isso levou à transformação e uso extensivo da TI em todas as empresas de manufatura. Tecnologias como ERP, MES, Sistema de Manufatura Flexível (FMS), Manufatura Auxiliada por Computador (CAM), Controle Numérico, entre outras, estão aumentando a produtividade, a eficiência operacional e aumentando a visibilidade do processo de manufatura. O uso de dispositivos móveis para monitorar e controlar remotamente processos complexos está reduzindo as taxas de falhas, assim como os custos para a organização (Hajoary, 2020).

A tecnologia de produção de manufatura evoluiu ao longo dos anos, desde o artesanato tradicional até o *job shop*, linha de montagem, *just-in-time* para sistemas de manufatura flexíveis. Essa evolução transformou a indústria manufatureira ao longo dos anos. Oito tecnologias capacitadoras vitais conduzirão a organização de manufatura para a Indústria 4.0: (1) IoT; (2) big data; (3) computação em nuvem; (4)

sistema ciberfísico; (5) robô autônomo; (6) manufatura aditiva; (7) realidade aumentada; e (8) inteligência artificial (Hajoary, 2020).

Para o modelo deste trabalho definiu-se como sendo a Dimensão 4: Tecnologia da Informação (TI), sendo definida pelos indicadores:

iTI1 – compartilhamento de informações;

iTI2 – utilização de computação em nuvem (*cloud computing*);

iTI3 – segurança de informações e comunicações;

iTI4 – sistemas integrados.

3.1.5 Serviços orientados por dados (SOD)

Os SOD referem-se à otimização do consumo inteligente de máquinas, da disponibilidade, do desempenho e da qualidade por meio de configurações otimizadas de parâmetros (Silva; Rocha, 2020). Buscam alinhar modelos de negócios futuros e aumentar os benefícios para os clientes. O pós-venda se baseará cada vez mais na avaliação e análise dos dados coletados e dependerá da integração em toda a empresa. Os produtos físicos em si devem ser equipados com TIC para que possam enviar, receber ou processar as informações necessárias para os processos operacionais que, por sua vez, são a base para serviços digitalizados na utilização dos produtos (Lichtblau *et al.*, 2015).

Para o modelo deste trabalho definiu-se como sendo a Dimensão 5: Serviços Orientados por Dados (SOD), sendo definida pelos indicadores:

iSOD1 – uso de dados;

iSOD2 – serviços e compartilhamento de dados;

iSOD3 – disponibilidade de serviços orientados por dados;

iSOD4 – compartilhamento de receitas derivadas de dados.

3.1.6 Produtos Inteligentes (PI)

Produtos Inteligentes são componentes vitais que facilitam a manufatura automática, com flexibilidade e eficiência. Os produtos são equipados com componentes de comunicação com sensores RFID para receber dados do ambiente e sobre seu próprio *status* (Lichtblau *et al.*, 2015). É possível também acompanhar e otimizar o *status* dos produtos por meio da capacidade dos aplicativos (Silva; Rocha, 2020).

Os PI's são objetos equipados com tecnologias avançadas que podem se comunicar com o ambiente, por meio da utilização de sensores para verificar o *status* em tempo real e oferecer outras funcionalidades adicionais na operação.

Os produtos são equipados com sensores inteligentes, RFID, GPS, sistemas embarcados, entre outros, para rastrear o *status*, a qualidade e a localização. Antigamente, as organizações de manufatura tradicionais produziam produtos com produção em massa padrão sem capacidade de diferenciação tardia, mas agora, com o uso de tecnologias avançadas, os produtos são personalizados de acordo com as necessidades dos clientes (Hajoary, 2020). A utilização de PI's possibilita novos serviços por meio da comunicação entre clientes e fabricantes.

As empresas usam dados históricos para gerar receita de clientes utilizando-se de análises e os produtos são transformados em um produto inteligente que os clientes podem rastrear de qualquer parte do mundo. Nesse sentido, os modelos de maturidade e prontidão da Indústria 4.0 ajudam a organização a acompanhar os recursos atuais de produtos e serviços, fornecendo roteiros futuros para a implementação (Hajoary, 2020).

Silva e Rocha (2020) determinaram os PI's observando-se as funções adicionais dos produtos e a porcentagem dos dados que são utilizados e analisados.

A integração de produtos inteligentes com um sistema de produção com o ciberespaço virtual facilita o autocontrole, o automonitoramento, a auto-organização e a utilização otimizada dos recursos, levando à obtenção da vantagem competitiva da organização, resultando no sucesso da Indústria 4.0 (Bassi, 2017; Sony; Naik, 2019).

Para Sony e Naik (2019) tornar os produtos ou serviços inteligentes é um dos dez fatores críticos, definidos pelos autores, para a implementação bem-sucedida da Indústria 4.0.

Para fabricar produtos e serviços em uma fábrica inteligente na Indústria 4.0, o produto ou serviço deve ser capaz de interagir com os processos de produção automatizados, flexíveis, eficientes e autorregulados. Esses produtos inteligentes são equipados com sensores, RFID, GPS etc., para coletar e transmitir dados próprios sobre o *status* da produção. Os CPS, por sua vez, usarão esses dados para auto-orientarem os produtos e serviços de forma automatizada e autorregulada, também em tempo real (Lichtblau *et al.*, 2015).

Os produtos inteligentes e os processos que se utilizam de sensores, RFID e GPS, quando incorporados com a fábrica inteligente, ajudarão a produção sustentável. Ao permanecer conectado durante todo o ciclo de vida do produto e coletar dados ao longo de todo o processo, não apenas fornecerá novos *insights* que permitirão que o produto atenda aos requisitos do cliente em tempo real, mas também ajudará a obter uma vantagem competitiva no ambiente de negócios (Sony; Naik, 2019).

Gadekar, Sarkar e Gadekar (2022) acreditam que é necessário investigar a relação entre produtos e operações inteligentes com a adoção da Indústria 4.0.

Para o modelo deste trabalho definiu-se como sendo a Dimensão 6: Produtos Inteligentes (PI), sendo definida pelos indicadores:

iPI1 - funcionalidades adicionais dos produtos;

iPI2 - dados utilizados que são analisados;

iPI3 – nível de integração com os processos produtivos;

iPI4 – nível de integração dos clientes com os fabricantes.

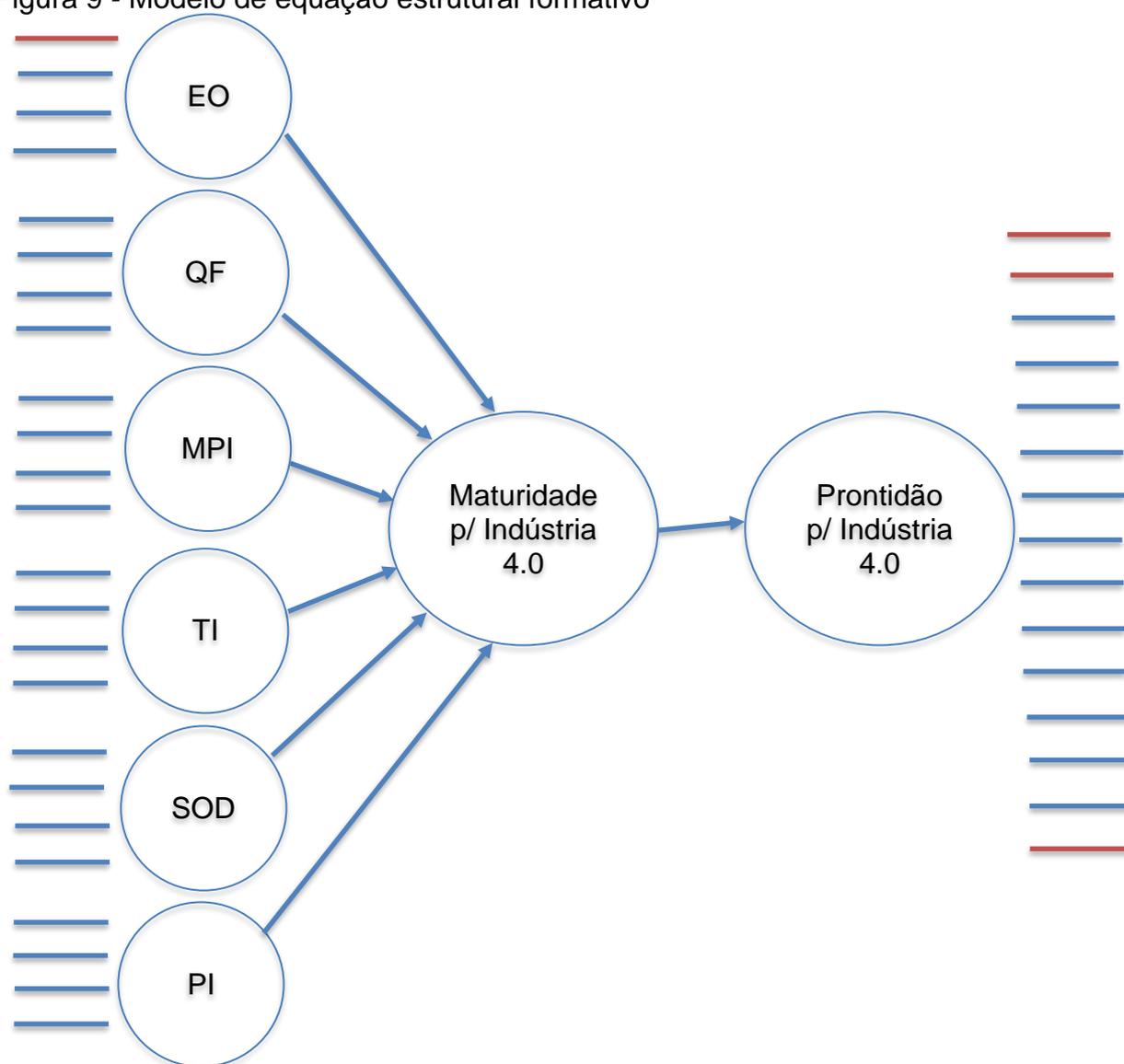
No próximo capítulo é apresentado um modelo no qual essas seis (6) dimensões, com seus respectivos indicadores, formam a maturidade e a relação com a prontidão tecnológica das empresas.

3.2 Modelo de equação estrutural

Propõe-se um modelo composto com 24 indicadores para 6 dimensões para avaliar a maturidade e 15 indicadores objetivos para verificar a prontidão da organização. Busca-se contribuir para a compreensão de futuros estudos e auxiliar também pesquisadores e profissionais sobre o assunto.

Com base em uma modelagem de equações estruturais apresentam-se as seis (6) dimensões de percepções independentes que têm um efeito positivo significativo na maturidade das organizações para implantação da Indústria 4.0: (i) estratégia e organização; (ii) qualificação dos funcionários; (iii) manufatura e processos inteligentes; (iv) tecnologia da informação; (v) serviços orientados por dados; e (vi) produtos inteligentes. E, de outro lado, a prontidão tecnológica formada por seus 15 indicadores objetivos.

Figura 9 - Modelo de equação estrutural formativo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O modelo apresentado neste trabalho (Figura 9) visou uma adequação dos modelos e ferramentas existentes que focaram nos aspectos organizacionais e que tiveram também como objetivos transformar os conceitos abstratos de manufatura inteligente em itens que possam ser medidos em ambientes de produção. Dessa forma, propôs-se oferecer um modelo que busque informações detalhadas sobre a estrutura das organizações, seus processos fabris, recursos tecnológicos e humanos para uma melhor implantação à Quarta Revolução Industrial, para, assim, poder tentar contribuir de que maneiras e formas essas empresas devem se preparar acerca deste novo modelo de produção.

Os indicadores das variáveis foram definidos de acordo com as principais tecnologias e processos necessários para criar futuras fábricas e empresas inteligentes com base na concepção da Quarta Revolução Industrial (Vrchota; Pech, 2019), e tecnologias habilitadoras/facilitadoras para implementação da Indústria 4.0 (Pacchini *et al.*, 2019).

As próximas subseções deste estudo foram baseadas no trabalho SmartPLS3: Especificação, estimação, avaliação e relato (Bido; Silva, 2019).

3.2.1 Modelo estrutural com variável latente de segunda ordem formativo (repetindo indicadores)

Esse primeiro modelo é composto com 24 indicadores para as 6 dimensões, as quais têm relações formativas com o índice de maturidade I4.0 (IMI40).

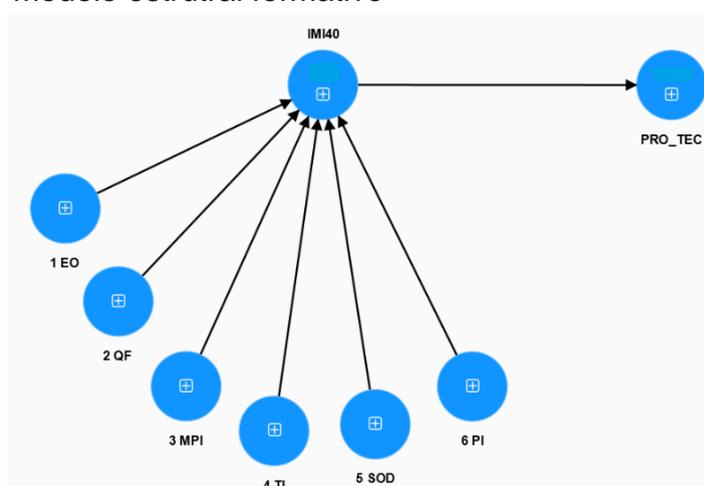
Uma VL de segunda ordem é obtida e mensurada por meio de outras duas ou mais VL's de primeira ordem, sendo modelada utilizando-se de Modelagem de Equações Estruturais (SEM) baseado em covariâncias (Bido; Silva, 2019).

Para poder realizar as iterações, no SmartPLS 4, a VL necessita de indicadores conectados a ela. Sendo assim, optou-se por reutilizar os indicadores das VL's de primeira ordem na de segunda ordem. Segundo Bido e Silva (2019) essa opção é recomendada no caso em que a quantidade de indicadores por VL seja aproximadamente igual (neste modelo, todas VL's de primeira ordem têm quatro (4)

indicadores). Dessa forma, evitou-se que alguma variável tivesse carga fatorial maior pelo simples fato de ter mais indicadores repetidos na VL de segunda ordem.

As relações entre a VL de segunda ordem e suas dimensões foram interpretadas e utilizadas, neste estudo, como cargas fatoriais, ou seja, não foram hipóteses. A única hipótese (relação estrutural) foi entre o Índice de Maturidade para Indústria 4.0 (IMI40) e a Prontidão Tecnológica (Figura 10).

Figura 10 - Modelo estrutural formativo



Nota 1: O Índice de Maturidade Indústria 4.0 (IMI40) é uma VL de segunda ordem.

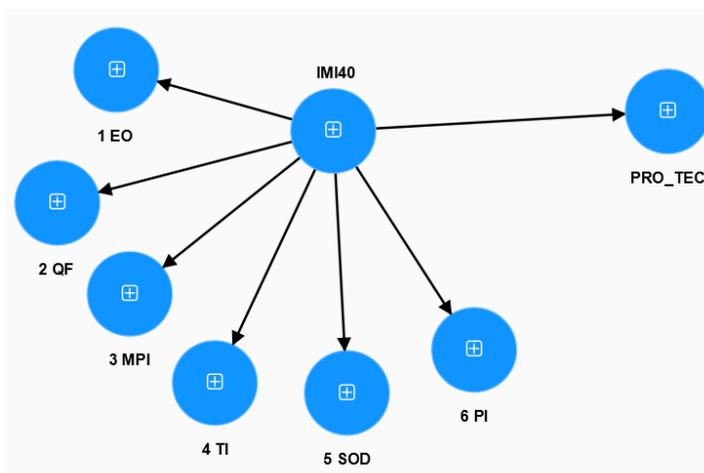
Nota 2: A VL IMI40 contém 24 indicadores (os indicadores das 6 VL's de primeira ordem foram repetidos), mas foram ocultos (*hide indicators*) para melhor visualização do modelo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.2.2 Modelo estrutural com variável latente de segunda ordem reflexivo (repetindo indicadores)

Nesse segundo modelo composto novamente com 24 indicadores para as 6 dimensões, mas com relações reflexivas com o índice de maturidade I4.0 (IMI40).

Figura 11 - Modelo estrutural reflexivo



Nota 1: O Índice de Maturidade Indústria 4.0 (IMI40) é uma VL de segunda ordem.

Nota 2: A VL IMI40 contém 23 indicadores (os indicadores das 6 VL's de primeira ordem foram repetidos), mas foram ocultos (*hide indicators*) para melhor visualização do modelo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Optou-se também nesse modelo por reutilizar os indicadores das VL's de primeira ordem na de segunda ordem para poder realizar as iterações, no SmartPLS 4, uma vez que a VL necessita de indicadores conectados a ela.

As relações entre a VL de segunda ordem e suas dimensões, foram também interpretadas e utilizadas como cargas fatoriais. Assim como no modelo anterior, a única hipótese nesse modelo foi entre o Índice de Maturidade para Indústria 4.0 (IMI40) e a Prontidão Tecnológica (Figura 11).

3.3 Amostra e Coleta de dados

A amostra deste trabalho contou com 98 respondentes/profissionais de diversas empresas, divididos da seguinte forma: Com relação ao setor/ramo das empresas dos entrevistados, 36,31% são do setor automobilístico; 12,63% de consultoria; 27,89% de tecnologia; 10,47% do setor químico; e 12,7% de outros setores. Com relação ao porte das empresas, 65,26% são de porte grande; 31,58% de porte médio e apenas 3,16% de pequeno porte. Os profissionais são: Com relação ao cargo/função dos entrevistados, 15,68% analistas; 23,34% CEO/diretores; 46,78% gerentes; e 14,2% de outros cargos. Com relação à área de conhecimento/formação,

49,47% são da engenharia; 31,58% da administração; 8,33% de TI; e 10,62% de outras áreas.

A coleta de dados foi realizada por meio do instrumento de pesquisa do modelo deste trabalho, que se encontra no Apêndice A, e foi encaminhado para cerca de 1300 profissionais de diversas organizações, o qual foi validado por meio de entrevistas, com especialistas, sendo dois (2) profissionais com experiência com a cadeia de suprimentos de empresas de manufatura e com seis (6) professores doutores universitários a respeito dos modelos de prontidão tecnológica e maturidade existentes e suas respectivas características e dimensões.

Um dos profissionais é pesquisador no Laboratório de Sistemas Produtivos Inteligentes - do Centro de Pesquisas do Instituto Mauá de Tecnologia em Manufatura Avançada, Indústria 4.0, modelagem de sistemas, valorização de resíduos sólidos urbanos e gestão de projetos para o Centro de Pesquisas. Possui larga experiência industrial: engenheiro de campo na Philips (Brasil e França), engenheiro e gerente de processos, qualidade e produtos na General Electric, incluindo transferência de tecnologia dos Estados Unidos e da Suécia (equipamentos de média e alta tensão para Itaipu Binacional, Furnas, CHESF, CEMIG, Eletropaulo, etc.), Gerente da Qualidade na indústria de estruturas metálicas (obras para Aracruz Celulose, Shopping Ibirapuera, Indústrias Villares, Alunorte, etc.), Gerente de Logística e Contratos em Sistemas de Automação Industrial para indústrias de alimentos e bebidas, química e petroquímica, mineração, transporte, higiene e limpeza, tratamento de água, etc. e Superintendente de Operações: engenharia, contratos, logística, suprimentos, fabricação, qualidade, pós-venda, garantia e assistência técnica para sistemas de automação industrial nos segmentos industriais citados (AMBEV, Alstom, Petrobrás, Vale, Andritz, Schincariol, Volkswagen, FIAT, General Motors, etc.).

O outro especialista tem 35 anos de experiência em indústrias de alimentos (Refinações de Milho, Brasil Ltda, Copersucar, Companhia União dos Refinadores, Bunge Foods, Best Foods, Unilever) nas áreas de Produção e Pesquisa e Desenvolvimento com ênfase no desenvolvimento e no gerenciamento sistêmico de embalagem. Atuou no Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia como coordenador do Curso de Engenharia de Produção de 2005 até 2019. É coordenador e professor do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Engenharia de Embalagem

desde 1998 e do Curso de Pós-graduação em Indústria 4.0, entre 2019 e 2022. No âmbito do Curso de Engenharia de Produção, coordenou a implantação do Projeto Fábrica Virtual, caracterizado pela criação de ambientes industriais virtuais para o projeto e gerenciamento de sistemas produtivos. Foi professor convidado do Curso de Pós-graduação em Gestão da Qualidade e Segurança dos Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Unicamp. É diretor da Pack Strat, empresa que presta serviços em desenvolvimento de sistemas de embalagem e otimização de processos produtivos.

Os seis (6) professores universitários possuem título de doutor e contribuíram sobremaneira com a estrutura do instrumento, bem como com os termos mais adequados da ortografia a fim de evitar o não entendimento das questões por parte dos respondentes. Além disso, dois (2) dos docentes ministram aulas no curso de Engenharia de Produção estando, assim, atualizados com o tema deste estudo.

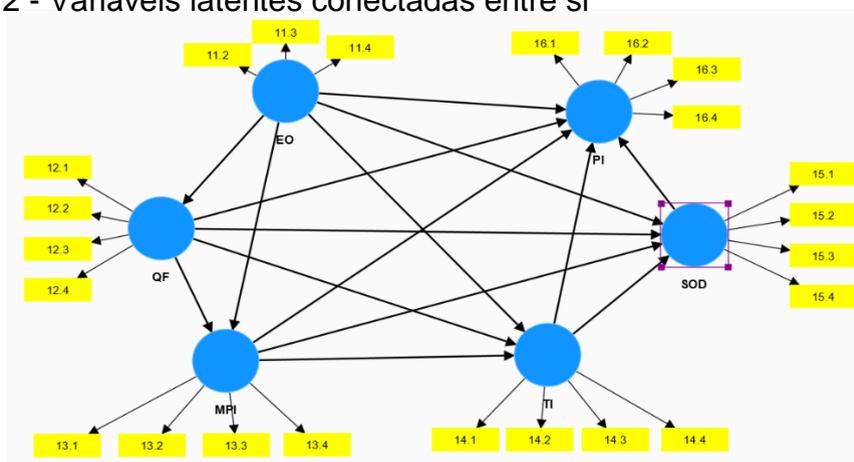
Foi encaminhado um documento para cada especialista com as instruções e contribuições que estes deveriam realizar nessa fase do estudo, opinando sobre o modelo desenvolvido, com seis (6) dimensões, formadas com 4 (quatro) indicadores cada, a fim de avaliar a maturidade tecnológica da organização; e também, de outro lado, 15 indicadores, definidos com o propósito de levantar a prontidão tecnológica na qual se encontram as empresas.

Um texto foi colocado como uma introdução ao respondente sobre a pesquisa, buscando realizar uma breve explicação e também apresentar o objetivo que se pretendia atingir (Apêndice A).

4 ANÁLISE DOS DADOS

Em uma primeira etapa, realizou-se uma análise fatorial confirmatória, na qual todas as variáveis latentes foram correlacionadas entre si, para se avaliar o modelo de mensuração.

Figura 12 - Variáveis latentes conectadas entre si



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados da Tabela 1, a seguir, foram obtidos selecionando-se no programa a opção “Path” em *Weighting Scheme* e clicando-se no botão “Start”.

No *Output PLS-SEM algorithm*

- *Quality Criteria*
 - *Discriminant Validity*
 - *Fornell-Larcker Criterion*
- E colocou-se em uma pasta do MS-Excel.
- *Construct reliability and validity*
- E colocou-se na mesma pasta do MS-Excel.

E em *Output Bootstrapping*

- *Quality Criteria*
 - *Latent variable correlations*
- E incluiu-se a Nota 2 no rodapé.

Tabela 1 - Matriz de correlações entre as variáveis latentes de primeira ordem

Variável Latente	1	2	3	4	5	6
1 EO	0,921					
2 QF	0,638	0,913				
3 MPI	0,742	0,673	0,907			
4 TI	0,717	0,727	0,782	0,938		
5 SOD	0,758	0,741	0,798	0,831	0,960	
6 PI	0,810	0,791	0,823	0,790	0,827	0,911
Confiabilidade composta (CR)	0,943	0,952	0,949	0,967	0,979	0,951
Variância Média Extraída (AVE)	0,848	0,833	0,823	0,880	0,921	0,830

Nota 1: Os valores em negrito na diagonal são a raiz quadrada da AVE.

Nota 2: Todas as correlações são significantes a 1%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 2, a seguir, foi elaborada da seguinte maneira:

No *Output PLS-SEM algorithm*

- *Quality Criteria*
 - *Discriminant Validity*
 - *Cross Loadings*

E colocou-se em uma pasta do MS-Excel.

No *Output Bootstrapping*

- *Final Results*, selecionou-se
 - *Outer loadings*

E incluiu-se a nota 1 no rodapé.

Os indicadores são listados em ordem alfabética e não por variável latente, assim sendo, enumeraram-se as variáveis latentes de tal maneira que os indicadores fossem agrupados com uma aparência de uma “escada”.

Tabela 2 - Matriz de cargas fatoriais

	1 EO	2 QF	3 MPI	4 TI	5 SOD	6 PI
11.2	0,937	0,543	0,648	0,650	0,653	0,710
11.3	0,894	0,654	0,751	0,643	0,742	0,783
11.4	0,930	0,558	0,642	0,687	0,694	0,738
12.1	0,555	0,923	0,630	0,630	0,627	0,775
12.2	0,652	0,919	0,621	0,737	0,781	0,733
12.3	0,550	0,950	0,606	0,607	0,656	0,754
12.4	0,565	0,857	0,600	0,675	0,633	0,622
13.1	0,627	0,682	0,887	0,652	0,638	0,733
13.2	0,715	0,626	0,961	0,692	0,699	0,780
13.3	0,744	0,545	0,882	0,753	0,794	0,706
13.4	0,601	0,594	0,897	0,739	0,762	0,769
14.1	0,680	0,685	0,761	0,939	0,768	0,731
14.2	0,667	0,653	0,710	0,933	0,746	0,765
14.3	0,663	0,690	0,694	0,941	0,739	0,736
14.4	0,682	0,700	0,767	0,939	0,861	0,733
15.1	0,722	0,758	0,796	0,822	0,958	0,847
15.2	0,743	0,734	0,792	0,823	0,966	0,795
15.3	0,732	0,708	0,763	0,797	0,971	0,782
15.4	0,713	0,640	0,710	0,743	0,943	0,747
16.1	0,695	0,748	0,739	0,720	0,721	0,886
16.2	0,734	0,760	0,701	0,670	0,772	0,932
16.3	0,789	0,756	0,812	0,769	0,777	0,941
16.4	0,731	0,616	0,746	0,718	0,744	0,884

Nota 1: Todas as cargas fatoriais são significantes a 1%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com os resultados obtidos nas Tabelas 1 e 2, pode-se afirmar que a avaliação do modelo de mensuração possui:

- Validade convergente:
 - No nível dos indicadores: carga > 0,7 (Tabela 2)
 - No nível das variáveis latentes: AVE > 0,5 (Tabela 1)
- Validade discriminante:
 - No nível das variáveis latentes: $\sqrt{AVE} > r_{VL}$ (Tabela 1)
 - No nível dos indicadores: cargas fatoriais > cargas cruzadas (na horizontal e vertical) (Tabela 2)
- Confiabilidade
 - Confiabilidade composta (CR) > 0,7 (Tabela 1)

Sendo assim, na primeira etapa, o modelo possui as validades convergente, discriminante e confiabilidade adequadas. Observou-se ainda que, na Tabela 2, todas as cargas fatoriais (em negrito) são maiores que as cargas cruzadas (valores “fora da diagonal”), confirmando a validade discriminante.

Embora tenham sido obtidos resultados nos quais a validade convergente, discriminante e a confiabilidade estivessem adequadas, observou-se que nem todas as cargas fatoriais estavam maiores que as cargas cruzadas. Por conta disso, decidiu-se por retirar o indicador 11.1 (iEO1 – conscientização e conhecimento da gestão) da VL Estratégia e Organização (EO), do modelo e realizar nova análise.

Nessa primeira etapa do modelo estrutural formativo, após a exclusão do indicador 11.1 (iEO1 – conscientização e conhecimento da gestão) da dimensão Estratégia e Organização (EO), foram atingidas as validades convergente e discriminante e uma confiabilidade adequadas.

Em uma segunda etapa, desenvolveu-se um modelo de mensuração das VL's que estão no modelo estrutural.

Observou-se que algumas cargas fatoriais estavam menores que as cargas cruzadas. Por conta disso, decidiu-se por retirar, um de cada vez, os indicadores 17.1(Máquinas e equipamentos realizam uso de sensores nos processos), 17.2 (Coleta e Análise de Dados) e 17.15 (Inteligência Artificial) da VL Prontidão Tecnológica (PRO_TEC) do modelo e realizar novas análises.

Notou-se também que o Fator de Inflação da Variância ou *Variance Inflation Factor* (VIF) da VL Produtos Inteligentes (PI) foi maior que 5,0 e para evitar a multicolinearidade, optou-se pela exclusão dessa variável.

A Tabela 3, a seguir, foi elaborada da mesma maneira que a Tabela 1:

No *Output PLS-SEM algorithm*

- *Quality Criteria*
 - *Discriminant Validity*
 - *Fornell-Larcker Criterion*

E colocou-se em uma pasta do MS-Excel.

- *Construct reliability and validity*

E colocou-se na mesma pasta do MS-Excel.

E em *Output Bootstrapping*

- *Quality Criteria*
 - *Latent variable correlations*

E incluiu-se a Nota 2 no rodapé.

Na tabela, os dados foram formatados, separados e foram colocados os valores da variável endógena na última linha e na coluna mais à direita da planilha.

Na Tabela 3, a VL de segunda ordem foi deletada, para realizar a avaliação das cargas cruzadas, excluiu-se a VL de segunda ordem e os indicadores repetidos, na Tabela 4 e na Tabela 5 as VL's de primeira ordem foram deletadas.

Tabela 3 - Matriz de correlações entre as VL formativo

(a) VL de primeira ordem	1	2	3	4	5	6
1 EO	0,921					
2 QF	0,638	0,913				
3 MPI	0,742	0,673	0,907			
4 TI	0,717	0,727	0,782	0,938		
5 SOD	0,758	0,741	0,798	0,831	0,960	
6 PRO_TEC	0,763	0,645	0,766	0,720	0,717	0,805
Confiabilidade composta (CR)	0,943	0,952	0,949	0,967	0,979	0,956
Variância Média Extraída (AVE)	0,848	0,833	0,823	0,880	0,921	0,647

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 4, a seguir, foi elaborada da mesma maneira que a Tabela 2:

No *Output PLS-SEM algorithm*

- *Quality Criteria*
 - *Discriminant Validity*
 - *Cross Loadings*

E colocou-se em uma pasta do MS-Excel.

No *Output Bootstrapping*

- *Final Results*, selecionou-se
 - *Outer loadings*

E incluiu-se a nota 1 no rodapé.

Tabela 4 - Matriz de cargas fatoriais do modelo estrutural

	1 EO	2 QF	3 MPI	4 TI	5 SOD	6 PRO_TEC
11.2	0,937	0,543	0,648	0,650	0,653	0,683
11.3	0,894	0,654	0,751	0,643	0,742	0,694
11.4	0,930	0,558	0,642	0,687	0,694	0,730
12.1	0,555	0,923	0,630	0,630	0,627	0,587
12.2	0,652	0,919	0,621	0,737	0,781	0,634
12.3	0,550	0,950	0,606	0,607	0,656	0,563
12.4	0,565	0,857	0,600	0,675	0,633	0,566
13.1	0,627	0,682	0,887	0,652	0,638	0,663
13.2	0,715	0,626	0,961	0,692	0,699	0,743
13.3	0,744	0,545	0,882	0,753	0,794	0,749
13.4	0,601	0,594	0,897	0,739	0,762	0,621
14.1	0,680	0,685	0,761	0,939	0,768	0,749
14.2	0,667	0,653	0,710	0,933	0,746	0,642
14.3	0,663	0,690	0,694	0,941	0,739	0,642
14.4	0,682	0,700	0,767	0,939	0,861	0,666
15.1	0,722	0,758	0,796	0,822	0,958	0,676
15.2	0,743	0,734	0,792	0,823	0,966	0,722
15.3	0,732	0,708	0,763	0,797	0,971	0,716
15.4	0,713	0,640	0,710	0,743	0,943	0,634
17.3	0,550	0,581	0,587	0,592	0,493	0,800
17.4	0,580	0,587	0,542	0,708	0,636	0,754
17.5	0,583	0,449	0,581	0,577	0,630	0,787
17.6	0,492	0,392	0,555	0,484	0,358	0,776
17.7	0,554	0,377	0,522	0,532	0,532	0,759
17.8	0,592	0,521	0,618	0,623	0,607	0,769
17.9	0,578	0,477	0,605	0,512	0,542	0,829
17.10	0,660	0,490	0,706	0,589	0,566	0,827
17.11	0,643	0,593	0,619	0,605	0,712	0,814
17.12	0,733	0,632	0,747	0,596	0,705	0,850
17.13	0,639	0,543	0,608	0,540	0,533	0,858
17.14	0,706	0,501	0,655	0,550	0,513	0,824

Nota 1: Todas as cargas fatoriais são significantes a 1%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Assim como nas Tabelas 1 e 2, os resultados nas Tabelas 3 e 4 apresentaram:

- Validade convergente:
 - No nível dos indicadores: carga > 0,7 (Tabela 4)
 - No nível das variáveis latentes: AVE > 0,5 (Tabela 3)
- Validade discriminante:
 - No nível das variáveis latentes: $\sqrt{\text{AVE}} > r_{\text{VL}}$ (Tabela 3)
 - No nível dos indicadores: cargas fatoriais > cargas cruzadas (na horizontal e vertical) (Tabela 4)

- Confiabilidade
 - Confiabilidade composta (CR) > 0,7 (Tabela 3)

Na terceira e última etapa apresentou-se os resultados do modelo estrutural, conforme Tabela 5.

No *Output Bootstrapping*

- *Final Results*
 - *Path coefficients*

E colocou-se em uma pasta do MS-Excel.

Excluiu-se a coluna “*Sample Mean (M)*”, incluiu-se as colunas para f^2 e R^2 ajustado.

No *PLS-SEM algorithm*

- *Quality Criteria*
 - *R square*
 - *f square*

Tabela 5 - Resultados do modelo estrutural formativo

Relação estrutural	f^2	Coefficiente estrutural	Desvio padrão	Valor-t	Valor-p	R^2 ajustado
IMI40->PRO_TEC	1,869	0,807	0,033	24,720	0,000	0,648

Nota: Com a exclusão da VL Produtos Inteligentes, o maior valor de VIF obtido foi de 4,639 (Em Quality Criteria – Collinearity Statistics (VIF) – Inner model – List)

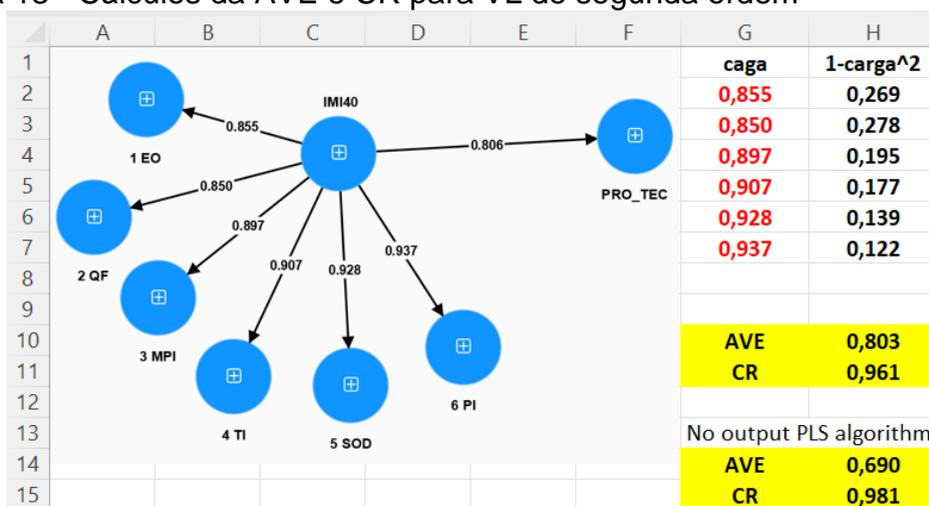
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados das matrizes de cargas fatoriais e das correlações entre as variáveis latentes de primeira ordem, bem como os resultados de AVE e CR não tiveram alterações entre os modelos formativo e reflexivo.

As relações entre a VL de segunda ordem e suas VL's de primeira ordem foram obtidas e colocadas em uma pasta do MS-Excel. Calculou-se também a AVE (Variância Média Extraída) e a CR (Confiabilidade Composta), pois o SmartPLS 4 realiza esses cálculos com os indicadores que foram repetidos na VL de segunda ordem.

Na Figura 13, a seguir, são apresentados os valores das relações entre as VL's de primeira ordem com a VL de segunda ordem, bem como os cálculos realizados para a obtenção da AVE e da CR.

Figura 13 - Cálculos da AVE e CR para VL de segunda ordem



Nota1: Para calcular a AVE: Em H10: =SOMAQUAD(G2:G7)/6.

Nota 2: Para calcular a CR: Em H11: =SOMA(G2:G7)^2/(SOMA(G2:G7)^2+SOMA(H2:H7))

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 6, a seguir, foi elaborada da seguinte maneira:

No *Output PLS-SEM algorithm*

- *Quality Criteria*
 - *Discriminant Validity*
 - *Fornell-Larcker Criterion*

E colocou-se em uma pasta do MS-Excel.

- *Construct reliability and validity*
- E colocou-se na mesma pasta do MS-Excel.

E em *Output Bootstrapping*

- *Quality Criteria*
 - *Latent variable correlations*
- E incluiu-se a Nota 2 no rodapé.

Na tabela, os dados foram formatados e separados, incluindo-se os valores calculados de AVE e CR, conforme Figura 13, por fim, foram colocados os valores da variável endógena na última linha e na coluna mais à direita da planilha.

Na Tabela 6, a VL de segunda ordem foi deletada, para realizar a avaliação das cargas cruzadas.

Tabela 6 - Matriz de correlações entre as VL reflexivo

(a) VL de primeira ordem	1	2	3	4	5	6	7
1 EO	0,921						
2 QF	0,638	0,913					
3 MPI	0,742	0,673	0,907				
4 TI	0,717	0,727	0,782	0,938			
5 SOD	0,758	0,741	0,798	0,831	0,960		
6 PI	0,810	0,791	0,823	0,790	0,827	0,911	
7 PRO_TEC	0,763	0,645	0,766	0,720	0,717	0,741	0,805
Confiabilidade composta (CR)	0,943	0,952	0,949	0,967	0,979	0,951	0,956
Variância Média Extraída (AVE)	0,848	0,833	0,823	0,880	0,921	0,830	0,647
(b) VL do modelo estrutural	1	2					
1 IMI40	0,831						
2 PRO_TEC	0,806	0,805					
Confiabilidade composta (CR)	0,961	0,956					
Variância Média Extraída (AVE)	0,803	0,647					

Nota 1: Os valores em negrito na diagonal são a raiz quadrada da AVE.

Nota 2: Todas as correlações são significantes a 1%.

Nota 3: O Índice de Maturidade Indústria 4.0 (IMI40) é uma VL de segunda ordem.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As validades convergente, discriminante e confiabilidade foram mantidas adequadas, neste modelo, tendo praticamente todas as cargas fatoriais maiores que as cargas cruzadas, confirmando a validade discriminante.

Tabela 7 - Resultados do modelo estrutural reflexivo

Relação estrutural	f ²	Coefficiente estrutural	Desvio padrão	Valor-t	Valor-p	R ² ajustado
IMI40->PRO_TEC	1,852	0,806	0,033	24,378	0,000	0,646

Nota: O valor de VIF obtido foi de 1,000 (Em Quality Criteria – Collinearity Statistics (VIF) – Inner model – List)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na segunda etapa dos dois modelos estruturais (formativo e reflexivo), observou-se que algumas cargas fatoriais da dimensão Prontidão Tecnológica (PRO_TEC) estavam menores que as cargas cruzadas. Por conta disso, decidiu-se por retirar, um de cada vez, esses indicadores do modelo e realizar novas análises.

O modelo formativo, na segunda etapa, também apresentou as validades convergente, discriminante e confiabilidade adequadas. Observou-se, na Tabela 4, que todas as cargas fatoriais (em negrito) são maiores que as cargas cruzadas (valores “fora da diagonal”), confirmando a validade discriminante.

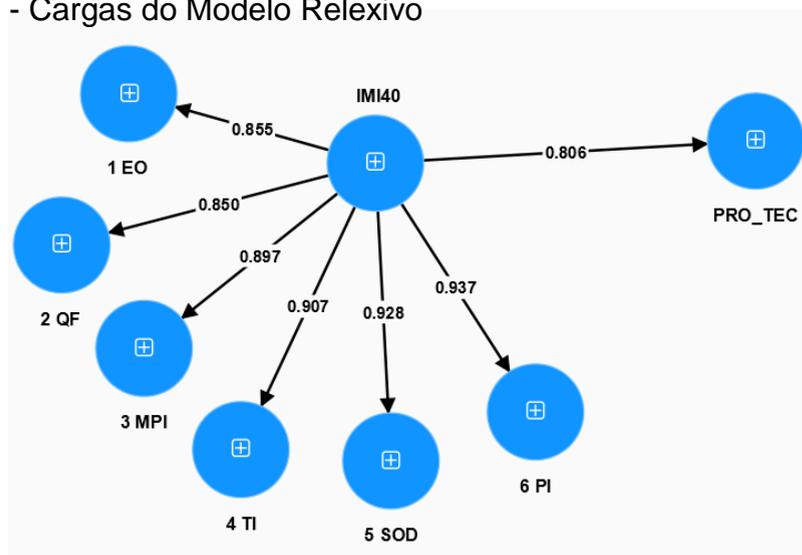
Os resultados obtidos na Tabela 5 mostram que, no modelo formativo, a importância relativa dos preditores pode ser considerada grande com o tamanho do efeito (f^2) igual a 1,869. O modelo reflexivo também apresentou resultados quanto à importância relativa (f^2) dos preditores como sendo grande e todas as correlações foram significantes a 1% (Cohen, 1988 *apud* Bido; Silva, 2019).

No modelo formativo, cinco (5) dimensões foram utilizadas para mensurar o Índice de Maturidade para a Indústria 4.0 (IMI40) e a variância explicada da variável endógena (R^2) foi de 64,8% da Prontidão Tecnológica, considerada grande e confirmando-se a hipótese proposta. Embora apenas no modelo estrutural formativo, notou-se que o VIF da dimensão Produtos Inteligentes (PI) foi maior que 5,0 e, para evitar a multicolinearidade, optou-se pela exclusão dessa dimensão nesse modelo.

Já no modelo estrutural reflexivo, os valores obtidos de VIF de todas VL's foi de 1,000, apresentando, assim, nesse modelo, uma vantagem por não ter tido a necessidade de exclusão de nenhuma dimensão, por conta de multicolinearidade, e ressaltando a importância de todas as dimensões para o modelo.

Verificou-se, conforme Figura 14 a seguir, que os objetivos deste estudo são alcançados, e que as cargas das relações entre as VL's de primeira ordem e a VL de segunda ordem (IMI40) são significativas, bem como a carga da relação entre a IMI40 e a Prontidão Tecnológica.

Figura 14 - Cargas do Modelo Reflexivo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No modelo estrutural reflexivo, foram obtidos valores de Confiabilidade composta (CR) e Variância Média Extraída (AVE) satisfatórios. Com todas as seis (6) dimensões utilizadas para mensurar o Índice de Maturidade para a Indústria 4.0 (IMI40), a variância explicada da variável endógena (R^2) foi de 64,6% da Prontidão Tecnológica, muito próximo do resultado obtido no modelo formativo (64,8%).

Em ambos os modelos essas variâncias podem ser consideradas altas, a hipótese foi significativa com Valor-P inferior a 1%, e a relação entre o Índice de Maturidade para a Indústria 4.0 e a Prontidão Tecnológica atingiu uma carga de 0,806, confirmando a hipótese deste trabalho da existência de uma relação positiva.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a relação entre a prontidão tecnológica e a maturidade das empresas de manufatura no contexto da implantação da Indústria 4.0. Dessa forma, o modelo proposto teve em sua estrutura as dimensões Estratégia e Organização, Qualificação dos Funcionários, Manufatura e Processos Inteligentes, Tecnologia da Informação, Serviços Orientados por Dados e Produtos Inteligentes, como preditores da variável latente de segunda ordem Índice de Maturidade para a Indústria 4.0 (IMI40), com um total de 23 indicadores; do outro lado da estrutura do modelo, a variável Prontidão Tecnológica, formada por 12 indicadores.

Neste trabalho foram apresentados dois (2) modelos estruturais (um formativo e outro reflexivo) nos quais os resultados mostraram que o IMI40 explicou com valor superior a 64,0% a Prontidão Tecnológica, o que pode ser considerado alto, além de ter uma carga de 0,806 na relação entre as variáveis.

Confirma a hipótese proposta, na qual o índice de maturidade influencia positivamente a prontidão tecnológica das empresas de manufatura no contexto da implantação da Indústria 4.0.

Um dos objetivos específicos foi avaliar como as dimensões contribuem para a maturidade da organização. Com os resultados obtidos nos modelos estruturais, foram verificados altos valores nas cargas dessas dimensões. No modelo reflexivo não houve a necessidade de exclusão de nenhuma dimensão, por conta de multicolinearidade, confirmando a importância de todas as dimensões para alcançar um índice de maturidade no contexto da Indústria 4.0.

Outro objetivo específico foi alcançado também com o levantamento das tecnologias que as empresas possuem e/ou utilizam e com a avaliação da prontidão tecnológica para a implantação da Quarta Revolução Industrial. Nos modelos inicialmente com quinze (15) indicadores, resultaram doze (12) indicadores de tecnologias com cargas fatoriais altas e maiores que as cargas cruzadas, confirmando suas contribuições para verificar a prontidão tecnológica das organizações. Por fim, o terceiro objetivo específico foi atingido com a medição da relação da prontidão tecnológica com a maturidade das empresas.

Notou-se, em estudos anteriores sobre o tema, que em muitos casos a maturidade e a prontidão tecnológica são tratadas como sinônimos. Entende-se a existência de uma diferença conceitual. Schumacher, Erol e Sihm (2016) entendem que a avaliação da prontidão é anterior ao processo de amadurecimento. A análise da maturidade mede um estado durante um momento do processo de amadurecimento. Entende-se que todas as empresas possuem um nível de maturidade, que pode ser alto, médio, baixo ou até nulo, logo, talvez o mais adequado seria afirmar que a prontidão tecnológica é anterior a um nível de maturidade alto, pois, enquanto a empresa não estiver suficientemente madura, não estará totalmente pronta.

Assim como Hajoary (2020), que contribuiu fornecendo uma estrutura abrangente de maturidade e prontidão para a Indústria 4.0 com as dimensões identificadas para uma implantação futura, este trabalho também espera ter contribuído dessa maneira.

Vrchota e Pech (2019) apresentaram categorias para os componentes da Indústria 4.0 em uma estrutura teórica e criaram um índice da Indústria 4.0 (VPi4), esta pesquisa aplicou um modelo com empresas de tamanhos diferentes e em momentos distintos quanto às novas tendências da TI, determinando por meio de um modelo estrutural, um Índice de Maturidade para a Indústria 4.0 (IMI40) e verificou-se sua relação com a Prontidão Tecnológica.

A limitação do estudo ocorreu por conta de abranger empresas de manufatura, além de os respondentes em sua maioria pertencerem à Região do Grande ABC. Como sugestão para estudos futuros seria um levantamento da relação deste trabalho em outras regiões do país, assim como em outros setores das empresas. Ressalta-se que cerca de 70,0% das respostas da amostra foram obtidas com participantes de dois eventos específicos sobre o tema.

Esta pesquisa espera contribuir nas ações futuras dos gestores em direção à adequação de suas organizações para a implantação dos novos conceitos e exigências da Indústria 4.0, a fim de melhorar seu desempenho frente a um novo mercado que surge.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, J.E. A “indústria 4.0” e a sustentabilidade do modelo de financiamento do Regime Geral da Segurança Social. Universidade do Porto (Portugal). **Cadernos de Direito Actual**, n. 5, p.243-254 ISSN 2340-860X v. Extraordinario. ISSN 2386-5229, 2017.
- ARAUJO, H.; RAMOS, M. V. C. Evolução da logística e cadeia de suprimentos de produtos farmacêuticos: Uma revisão bibliográfica. **Revista Gestão em Foco**, ed.15, 2023.
- BASSI, L. IEEE 3RD INTERNATIONAL FORUM ON RESEARCH AND TECHNOLOGIES FOR SOCIETY AND INDUSTRY (RTSI), Modena, Italy, **Industry 4.0: Hope, hype or revolution?** p. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/rtsi.2017.8065927>, 2017.
- BECKER, J.; KNACKSTEDT, R.; PÖPPELBUß, J. **Desenvolvimento de modelos de maturidade para TI gestão**. Ônibus. Inf. Sistema Eng. 1, p. 213-222, 2009
- BIDO, D. S.; SILVA, D. SmartPLS 3: Especificação, estimação, avaliação e relato. **Administração: Ensino e Pesquisa (RAEP)**, v. 20, n. 2, p. 488-536. doi: <https://doi.org/10.13058/raep.2019.v20n2.1545>, 2019.
- BRASIL. Ministério da Economia. Governo Federal. Brasil terá primeiro centro afiliado ao Fórum Econômico Mundial focado na Indústria 4.0: Objetivo é preparar as empresas do País para a quarta revolução industrial. **Inovação**, Brasília, Brasil. 07 nov. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/canais_atendimento/imprensa/pautas/2020/01/brasil-tera-primeiro-centro-afiliado-ao-forum-economico-mundial-focado-na-industria-4.0>. Acesso em 17 de janeiro de 2022.
- BRECHER, C.; ECKER, C.; HERFS, W.; OBDENBUSCH, M.; JESCHKE, S.; HOFFMANN, M.; MEISEN, T. Chapter 21 - **The Need of Dynamic and Adaptive Data Models for Cyber-Physical Production Systems**. In: SONG, H. *et al.* (Eds.). *Intelligent Data-Centric Systems*. Boston: Academic Press., p. 321–338, 2017.
- CAIADO, R. G. G.; SCAVARDA, L. F.; GAVIÃO, L. O.; IVSON, P.; NASCIMENTO, D. L. M.; GARZA-REYES, J. A. A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. **International Journal of Production Economics**, v.231. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883>, 2021
- CANETTA, L.; BARNI, A.; MONTINI, E. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING, TECHNOLOGY AND INNOVATION (ICE/ITMC), Stuttgart, Germany, **Development of a Digitalization Maturity Model for the Manufacturing Sector**. p. 1-7. doi: [10.1109/ICE.2018.8436292](https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436292), 2018
- CEREZO-NARVAEZ, A.; OTERO-MATEO, M.; PASTOR-FERNANDEZ, F. 7TH IESM CONFERENCE, Saarbrücken, Germany, **Development of professional competencies for Industry 4.0 project management**, p. 11–13, 2017.

CHAUHAN, C.; SINGH, A. **Journal of Manufacturing Technology Management**. ISSN: 1741-038X, v. 31, n. 5, p. 863-886, doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2018-0105>, 2020

COELHO, P. M. N. **Rumo à Indústria 4.0**. Dissertação de mestrado. Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Mecânica. Coimbra: 2016.

COSTA, O. S.; GOUVEIA, L.M. B. Indústria 4.0: Uma Proposta de Modelo de Transformação Digital para as Pequenas e Médias Empresas. In: MARTINS, E. R. (org.). **Engenharia de Produção Planejamento e Controle da Produção em Foco**, v.1, Guarujá, p. 117-133, 2021.

CULOT, G.; NASSIMBENI, G.; ORZES, G.; SARTOR, M. Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. **International Journal of Production Economics**, v. 226, 2020.

CUNHA, T. P. **Proposta de direcionadores para implantação dos conceitos da Indústria 4.0 em empresas de ti**. Niterói, p. 99, 2018.

CZECH Statistical Office. **High-Tech Sektor**. Available on-line: https://www.czso.cz/csu/czso/high_tech_sektor

DANTAS, T. E. T.; HAMMES, G.; SOUZA, E.D.; CAMPOS, L. M. S.; SOARES, S. R. XX ENGEMA, São Paulo, Brasil, **Convergências entre as práticas da Indústria 4.0 e os princípios da Economia Circular**, 2018.

DE CAROLIS, A. MACCHI, M. NEGRI, E. TERZI, S. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING, TECHNOLOGY AND INNOVATION, **Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization roadmap**, p. 487-495, 2017.

DEMIR, S.; GUNDUZ, M.A.; KAYIKCI, Y.; PAKSOY, T. Readiness and Maturity of Smart and Sustainable Supply Chains: A Model Proposal. **Engineering Management Journal**. doi: 10.1080/10429247.2022.2050129, 2022.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: hit or hype? [industry forum]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 8, ed. 2, p. 56–58, 2014.

ERBOZ, G. **How to define Industry 4.0**: main pillars of Industry 4.0. Managerial trends in the development of enterprises in globalization era. Szent Istvan University, Faculty of Economics and Social Sciences, Business and Management, 2017.

EUROPEAN COMMISSION. **SMEs to the industry 4.0**. Publicação em 23 de novembro de 2018. Disponível em: <<https://s3platform.jrc.ec.europa.eu/sme-integration-to-industry-4.0>>. Acesso em 09 de maio de 2021.

FRAGAPANE, G.; IVANOV, D.; PERON, M.; SGARBOSSA, F.; STRANDHAGEN, J. O. Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with

autonomous mobile robots and smart intralogistics. **Annals of Operations Research** n. 308, p. 125–143, 2022.

GADEKAR, R.; SARKAR, B.; GADEKAR, A. Investigating the relationship among Industry 4.0 drivers, adoption, risks reduction, and sustainable organizational performance in manufacturing industries: An empirical study. **Sustainable Production and Consumption**. v. 31, p. 670-692, doi: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.010>, 2022

GOBO JUNIOR, P. **Um modelo de maturidade da Indústria 4.0 aplicado na cadeia de suprimentos**. Fundação Getúlio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo. São Paulo: Dissertação de mestrado profissional MPGC, 2020.

GORECKY, D.; SCHMITT, M.; LOSKYLL, M.; Detlef ZÜHLKE, D., 12TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN), Porto Alegre, Brazil, **Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 era**, p. 289-294, doi: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2014.6945523>, 2014.

GORI, R. S. L.; GORI, D. D. L. Smart Factory e a indústria 4.0: uma revisão sistemática de literatura. **Revista Sítio Novo**, Palmas, e-ISSN 2594-7036, v. 6, n. 2 p. 141-155, 2022.

GOVINDARAJO, N. S.; KUMAR M, D.; SHAIKH, E.; KUMAR, M.; KUMAR, P. Industry 4.0 and Business Policy Development: Strategic Imperatives for SME Performance. **ETIKONOMI**, v. 20, n. 2, p. 239–258. doi: <https://doi.org/10.15408/etk.v20i2.20143>, 2021.

GUNES, V.; PETER, S.; GIVARGIS, T.; VAHID, F. A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems. **KSII Transactions on Internet and Information Systems**, v. 8, n. 12, p. 4242–4268. doi: <https://doi.org/10.3837/tiis>, 2014.

HAJOARY, P. K. Industry 4.0 Maturity and Readiness Models: A Systematic Literature Review and Future Framework. **International Journal of Innovation and Technology Management**. World Scientific Publishing Company, v. 17, n. 7, p.37. doi: <https://doi.org/10.1142/S0219877020300050>, 2020.

HAJOARY, P. K. Development and Validation of Industry 4.0 Readiness Scale - A Formative Model. **International Journal of Innovation and Technology Management**. World Scientific Publishing Company, v. 19, n. 6, doi:10.1142/S0219877021400113, 2022.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. PROCEEDINGS OF 49TH HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES HICSS, Koloa, **Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review**, p. 3928–3937, doi: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>, 2016.

HOFMANN, E., STERNBERG, H., CHEN, H., PFLAUM, A., PROCKL, G. Supply chain management and Industry 4.0: conducting research in the digital age.

International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, v. 49, n. 10, p. 945-955. doi: <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-11-2019-399>, 2019.

HUANG, C. J., CHICOMA, E. D. T., HUANG, Y. H. Evaluating the Factors that are Affecting the Implementation of Industry 4.0 Technologies in Manufacturing MSMEs, the Case of Peru. **MDPI - Processes**, v. 7, n. 161. doi:10.3390/pr7030161, 2019

JABBOUR, A. B. L. S.; JABBOUR, C. J. C.; FOROPON, C.; FILHO, M. G. **When titans meet** – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. In: *Technological Forecasting & Social Change*. [S.l.]: Elsevier Inc., v. 132, p. 18-25, 2018.

JAMWAL, A.; AGRAWAL, R.; SHARMA, M.; KUMAR, V.; KUMAR, S. Developing A sustainability framework for Industry 4.0. **Procedia CIRP**, v. 98, p. 430-435, 2021.

JAYASHREE, S.; REZA, M. N. H.; MALARVIZHI, C. A. N.; MOHIUDDIN, M. Industry 4.0 implementation and Triple Bottom Line sustainability: an empirical study on small and medium manufacturing firms. **Heliyon**, v. 7, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07753>.

JOCHEM, R.; GEERS, D.; HEINZE, P. Maturity measurement of knowledge-intensive business processes. **The TQM Journal**, v. 23, n. 4, p. 377-387, 2011.

JUCÁ JUNIOR, A. S.; CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C. Maturidade em gestão de projetos em pequenas empresas desenvolvedoras de software do Polo de Alta Tecnologia de São Carlos. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 17, n. 1, p. 181-194, 2010.

KOHLEGGER, M.; MAIER, R.; THALMANN, S. Understanding Maturity Models Results of a Structured Content Analysis. **Proceedings of I-KNOW '09 and I-SEMANTICS '09 Graz**, Austria, p.51-61, 2009.

LEE, E. A. 1TH IEEE SYMPOSIUM ON OBJECT ORIENTED REAL-TIME DISTRIBUTED COMPUTING (ISORC), **Cyber Physical Systems: Design Challenges**, p. 363-369, 2008.

LEE, J.; KAO, H.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and *Big Data* environment; Product Services Systems and Value Creation. **Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, Procedia CIRP**, 16, p.3-8, 2014.

LI, M.; HUANG, G. Q. Production-intralogistics synchronization of industry 4.0 flexible assembly lines under graduation intelligent manufacturing system. **International Journal of Production Economics**, v. 241, 2021.

LICHTBLAU K., STICH, V., BERTENRATH, R., BLUM, M., BLEIDER, M., MILLACK, A., SCHMITT, K., SCHMITZ, E. & SCHRÖTER, M. **Industrie 4.0** - Readiness On-line Self-Check for Businesses, 2015. Disponível em: <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>. Acesso em: 26 out. 2021.

MARIA, S.; DARMA, D. C.; AMALIA, S.; HAKIM, Y. P.; PUSRIADI, T. Readiness To Face Industry 4.0. **International Journal Of Scientific & Technology Research**, ISSN 2277-8616, v. 8, ed. 9, 2019.

MASOOD, T.; SONNTAG, P. Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. **Computers in Industry**, v. 121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261>, 2020.

MITTAL, S.; KHAN, M.A.; ROMERO, D.; WUEST, T. A critical review of smart manufacturing 105 & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). **106 Journal of Manufacturing Systems**, v. 49, p. 194-214, 2018.

MOHAMED, M. Challenges and Benefits of Industry 4.0: An overview. **International Journal of Supply and Operations Management**, v. 5, n. 3, p. 256-265, 2018

MOURA, L. R.; KOHL, H. Maturity Assessment in Industry 4.0 – A Comparative Analysis of Brazilian and German Companies. **Emerging Science Journal**, v. 4, n. 5, p. 365-375, 2020.

NGUYEN, X. T.; LUU, Q. K. Factors Affecting Adoption of Industry 4.0 by Small- and Medium-Sized Enterprises: A Case in Ho Chi Minh City, Vietnam. **Journal of Asian Finance, Economics and Business**, v. 7, n. 6, p. 255-264. doi: 10.13106/jafeb, 2020.

OLSEN, T. L.; TOMLIN, B. **Industry 4.0**: Opportunities and Challenges for Operations Management. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 22, n. 1, p. 113-122, 2020.

PACCHINI, A. P. T.; LUCATO, W. C.; MUMMOLO, FACCHINI, F.; MUMMOLO, G. The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. **Computers in Industry**, v. 113, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103125>.

PECH, M.; VRCHOTA, J. Classification of Small- and Medium-Sized Enterprises Based on the Level of Industry 4.0 Implementation. **MDPI - applied sciences**. Appl. Sci. 10, 5150, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/app10155150>.

RAUTENBERG, S.; CARMO, P. R. V. *Big Data e Ciência de Dados: complementariedade conceitual no processo de tomada de decisão*. **Brazilian Journal of Information Studies: Research Trends**, v. 13, n. 1, p. 56-67, 2019.

REHMAN, H. M.; AU YONG, H. N.; CHOONG, Y. O. Impact of management practices on organisational innovation in the digital age: a study of the manufacturing industry in Malaysia. **International Journal of Management Studies**, v. 28, n. 2, p. 73-101, 2021. doi: <https://doi.org/10.32890/ijms2021.28.2.4>.

ROBLEK, V.; MESKKO, M.; KRAPEZ, A. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, 2016. doi: <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>.

SALOMON, D. V. **Como fazer uma monografia**. ed.11, São Paulo: Martins Fontes, 2004.

SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T.D.F.M.; CHARRUA-SANTOS, F.M.B. Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades. **RPD - Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.

SANTOS, R. C. **Proposta de modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0**. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Coimbra: 2018.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. Tradução de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: ed. Edipro, 2016.

SCHUH, G.; ANDERL, R.; DUMITRESCU, R.; KRÜGER, A.; HOMPEL, M. Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies, **Acatech STUDY**, 2020.

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, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>.

SEBRAE-SP. **Mercado e Vendas**. Micro e pequenas empresas geram 27% do PIB do Brasil. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites>. Acesso em 23 set. 2021.

SEBRAE-SP. **Pesquisa: Causa Mortis**: o sucesso e o fracasso das empresas nos primeiros cinco anos de vida. São Paulo: SEBRAE, 2014. Disponível em: www.sebrae.com.br. Acesso em: 09 maio 2021.

SEGURA, A., DIEZ, H.V., ARBELAIZ, A., POSADA, J., GARCÍA-ALONSO, A. Visual Computing Technologies to support the Operator 4.0. **Computers & Industrial Engineering**, v. 139, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.060>.

SHI, Z.; XIE, Y.; XUE, W.; CHEN, Y.; FU, L.; XU, X. Smart factory in Industry 4.0. **Systems Research and Behavioral Science**, p. 1-11, 2020. doi: <https://doi.org/10.1002/sres.2704>.

SILVA, M. C.; SOUZA, F. J. V.; ARAÚJO, F. R.; SILVA, J. D. G. Metodologia científica para as ciências sociais aplicadas: análises críticas sobre métodos e tipologias de pesquisas e destaque de contribuições de Marx, Weber e Durkheim. **Revista Científica Hermes**, n. 13, p. 159-179, 2015.

SILVA, M.; ROCHA, C. Avaliação do Nível de Maturidade da Indústria 4.0: o Caso de uma Empresa Estratégica de Defesa. **Future Studies Research Journal: Trends and Strategies [FSRJ]**, v. 12, n. 1, p. 31-59, 2020. doi: <https://doi.org/10.24023/FutureJournal/2175-5825/2020.v12i1.455>.

SONY, M.; NAIK, S. Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. **Production Planning & Control**, v. 31, p.1-17, 2019. doi: <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1691278>.

SOUZA, C. A. **Sistemas integrados de gestão empresarial**: estudos de caso de implementação de sistemas ERP. São Paulo: FEA/USP, p. 253, 2000.

STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. Science Direct - 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use - **Procedia CIRP 40**, p. 536-541, 2016.

SZOZDA, N. Industry 4.0 and its impact on the functioning of supply chains, **LogForum** v. 13, n. 4, p. 401-414, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.17270/J.LOG.2017.4.2>.

TANG, Y. Research on Medical Device Software Development and Design Based on CMMI Model. **INT. J. BIOAUTOMATION**, v. 23, n. 4, p. 469-47, 2019.

TENG, H. H. **As características das pequenas e médias empresas e sua relação com a adoção das tecnologias da Indústria 4.0**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Paulista – UNIP, 2021.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. Estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 2012.

URBIKAIN, G.; ALVAREZ, A.; LÓPEZ DE LACALLE, L.N.; ARSUAGA, M.; ALONSO, M.A.; VEIGA, F. A reliable turning process by the early use of a deep simulation model at several manufacturing stages. **MDPI - Machines**, 2017.

VANALLE, R. M.; SALLES, J. A. A. Relação entre montadoras e fornecedores: modelos teóricos e estudos de caso na indústria automobilística brasileira. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 237-250, 2011.

VELHO, R. K.; SIMONETTI, M. L.; SOUZA, C. R. P.; IKEGAMI, M. Y. Nível de Maturidade Tecnológica: uma sistemática para ordenar tecnologias **Parc. Estrat.**, Brasília-DF, v. 22, n. 45, p. 119-140, 2017.

VENANCIO, A. L. A. C.; BREZINSKI, G. L. **Sistema de avaliação de maturidade industrial baseando-se nos conceitos da indústria 4.0**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica Engenharia de Controle e Automação. Curitiba: 2017.

VEZA, I.; MLADINEO, M.; PEKO, I. 15TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING – CIM2015, Croatian Association of Production Engineering, Zagreb, **Analysis of the current state of Croatian manufacturing industry with regard to Industry 4.0**, 2015.

VRCHOTA, J.; PECH, M. Readiness of Enterprises in Czech Republic to Implement Industry 4.0: Index of Industry 4.0. **MDPI - applied sciences**. Appl. Sci. 9, 5405, 2019. doi: <https://doi.org/doi:10.3390/app9245405>.

WALTER, O. M. F. C.; PALADINI, E. P.; HENNING, E.; KONRATH, A. C. INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT- ABEPRO-ADINGOR-IISE-AIM-ASEM (IJCIEOM),

Industry 4.0 maturity models: review and classification as a support for Industry 4.0 implementation, 2020.

XAVIER, M. L. P.; SOUZA, A. C. M.; RODRIGUES, J. P.; BRESCIANI, L. P. O novo perfil econômico do Grande ABC. **Revista Organizações em Contexto (ROC)** – Universidade Metodista de São Paulo (UMESP), v. 3, n. 6, 2007.

YADAV, G.; KUMAR, A.; LUTHRA, S.; GARZA-REYES, J. A.; KUMAR, V.; BATISTA, L. A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry 4.0 technologies' enablers. **Computers in Industry**, v. 122, 2020.

YU, Y.; ZHANG, J. Z.; CAO, Y.; KAZANCOGLU, Y. Intelligent transformation of the manufacturing industry for Industry 4.0: Seizing financial benefits from supply chain relationship capital through enterprise green management. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 172, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120999>.

APÊNDICE A – INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

Esta pesquisa faz parte de um amplo estudo que tem como objetivo avaliar a relação entre a prontidão tecnológica e a maturidade das empresas de manufatura no contexto da implantação da Indústria 4.0. Nesse sentido, espera-se contar com a participação dos profissionais dessas organizações, de forma a reproduzir com fidedignidade essa relação.

É importante destacar que:

1. O tempo de preenchimento do questionário é de 20 minutos aproximadamente.
2. Não existe resposta certa ou errada. O importante é a veracidade da resposta, no sentido de que essa expresse a forma de pensar, atuar e avaliar o cotidiano do trabalho na empresa.
3. Os dados coletados de cada participante serão agregados aos dos demais participantes, mantendo, assim, o sigilo das informações individuais.
4. Você poderá deixar um e-mail para receber uma síntese do mapeamento obtido a partir desse levantamento.
5. A participação não é obrigatória e você poderá interrompê-la a qualquer momento. Contudo, ressalta-se a importância de sua participação para a construção deste mapeamento do ambiente de trabalho na empresa.

Sua concordância em participar da pesquisa deve ser registrada, assinalando em “concordo” para continuar com o formulário nas páginas seguintes.

Concordo com tudo o que foi escrito acima e declaro meu consentimento para participar do estudo.

Não desejo participar do estudo

Se desejar receber uma síntese do mapeamento obtido a partir desse estudo deixe seu e-mail. _____

PERFIL DA EMPRESA / RESPONDENTE

As questões a seguir visam unicamente formar um perfil dos participantes do estudo.

1. Empresa. _____

2. Setor / Ramo de atividade. _____

3. Porte.

- Microempresa (até 19 colaboradores)
- Pequeno porte (20 até 99 colaboradores)
- Médio porte (100 até 499 colaboradores)
- Grande porte (acima de 500 colaboradores)

4. Há quantos anos a empresa participa da rede da cadeia de suprimentos. _____

5. Fornece para alguma empresa de grande porte que possa exigir a implantação da Indústria 4.0?

- Sim Não

6. Cargo / função do respondente. _____

7. Departamento que atua. _____

8. Área do conhecimento / formação do respondente. _____

9. Há quantos anos trabalha na empresa. _____

10. Participa das decisões estratégicas da empresa?

- Sim Não

Essa pesquisa foi dividida em seis (6) grupos de perguntas relacionando estratégia organizacional, pessoas, processos, tecnologias, orientação de dados e produtos.

Dimensão I - Estratégia e Organização (EO)

11. Avaliando o atual cenário estratégico da sua organização, indique em cada frase, o quanto discorda ou concorda com a situação apresentada. Para isso, utilize a escala de pontos de 0 a 10, sendo que 0 (zero) significa discordo totalmente e 10 (dez) significa concordo totalmente. Quanto menos concordar, menor deverá ser a pontuação; e quanto mais concordar, maior deverá ser a pontuação.

Discordo Totalmente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Concordo Totalmente
11.1 Os gestores têm amplo conhecimento sobre a Indústria 4.0, e reconhecem sua importância, oportunidades e desafios.												
11.2 Há um plano estratégico bem definido e detalhado para a implantação da Indústria 4.0.												
11.3 Utiliza-se de indicadores para revisar estratégias e rastrear o <i>status</i> de implementação da Indústria 4.0.												
11.4 De acordo com o cenário econômico atual, os investimentos da empresa foram suficientes e atribuídos de forma adequada para realização da implantação dos conceitos da Indústria 4.0.												

Dimensão II - Qualificação dos Funcionários (QF)

12. Avaliando a qualificação dos funcionários da sua organização nas diversas áreas de tecnologias, para a implantação da Indústria 4.0, indique em cada frase, o quanto discorda ou concorda com a situação apresentada. Para isso, utilize a escala de pontos de 0 a 10, sendo que 0 (zero) significa discordo totalmente e 10 (dez) significa concordo totalmente. Quanto menos concordar, menor deverá ser a pontuação; e quanto mais concordar, maior deverá ser a pontuação.

Discordo Totalmente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Concordo Totalmente
12.1 Possui nível de qualificação dos funcionários na área de infraestrutura de TI alto e adequado.												
12.2 Possui nível de qualificação da equipe responsável pela análise dos dados gerados alto e adequado.												
12.3 Possui nível de qualificação dos funcionários na área de desenvolvimento de software ou aplicação de sistemas de suporte alto e adequado.												
12.4 Possui nível de qualificação da equipe responsável pela segurança de informações e comunicações alto e adequado.												

Dimensão III - Manufatura e Processos Inteligentes (MPI)

13. Avaliando a atual infraestrutura dos equipamentos da fábrica, bem como, o nível de automação dos seus processos, a utilização de Sistemas Ciber Físicos (CPS) e de Internet das Coisas (IoT) para implantação da Indústria 4.0, da sua organização, indique em cada frase, o quanto discorda ou concorda com a situação apresentada. Para isso, utilize a escala de pontos de 0 a 10, sendo que 0 (zero) significa discordo totalmente e 10 (dez) significa concordo totalmente. Quanto menos concordar, menor deverá ser a pontuação; e quanto mais concordar, maior deverá ser a pontuação.

Discordo Totalmente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Concordo Totalmente
13.1 A infraestrutura dos equipamentos de manufatura é adequada para o uso de tecnologias habilitadoras.												
13.2 A inteligência e automação dos processos de manufatura é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												
13.3 A utilização de Sistemas Ciber Físicos (CPS) é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												
13.4 A utilização de Internet das Coisas (IoT) é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												

Dimensão IV - Tecnologia da Informação (TI)

14. Avaliando o atual cenário da sua organização com relação à Tecnologia da Informação da sua organização nas diversas áreas organizacionais, em especial da rede da cadeia de suprimentos da área de manufatura, para a implantação da Indústria 4.0, indique em cada frase, o quanto discorda ou concorda com a situação apresentada. Para isso, utilize a escala de pontos de 0 a 10, sendo que 0 (zero) significa discordo totalmente e 10 (dez) significa concordo totalmente. Quanto menos concordar, menor deverá ser a pontuação; e quanto mais concordar, maior deverá ser a pontuação.

Discordo Totalmente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Concordo Totalmente
14.1 O compartilhamento de informações é adequado para a implantação da Indústria 4.0.												
14.2 A utilização de computação em nuvem é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												
14.3 A segurança de informações e comunicações é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												
14.4 A utilização de sistemas integrados é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												

Dimensão V - Serviços Orientados por Dados (SOD)

15. Avaliando da sua organização, os Serviços Orientados por Dados, a otimização, automação e a eficácia no uso inteligente das máquinas por meio de configurações previamente parametrizadas para a implantação da Indústria 4.0, indique em cada frase, o quanto discorda ou concorda com a situação apresentada. Para isso, utilize a escala de pontos de 0 a 10, sendo que 0 (zero) significa discordo totalmente e 10 (dez) significa concordo totalmente. Quanto menos concordar, menor deverá ser a pontuação; e quanto mais concordar, maior deverá ser a pontuação.

Discordo Totalmente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Concordo Totalmente
15.1 A utilização dos dados é eficaz, otimizada e adequada para a implantação da Indústria 4.0.												
15.2 O uso de serviços e compartilhamento de dados é adequado para a implantação da Indústria 4.0.												
15.3 A disponibilidade de serviços orientados por dados é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												
15.4 O compartilhamento de receitas oriundas de dados é adequado para a implantação da Indústria 4.0.												

Dimensão VI - Produtos Inteligentes (PI)

16. Avaliando os objetos equipados, da sua organização, com tecnologias avançadas para a implantação da Indústria 4.0 que se comunicam com o ambiente por meio de sensores para verificar o *status* em tempo real, indique em cada frase, o quanto discorda ou concorda com a situação apresentada. Para isso, utilize a escala de pontos de 0 a 10, sendo que 0 (zero) significa discordo totalmente e 10 (dez) significa concordo totalmente. Quanto menos concordar, menor deverá ser a pontuação; e quanto mais concordar, maior deverá ser a pontuação.

Discordo Totalmente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Concordo Totalmente
16.1 As funcionalidades adicionais dos produtos são adequadas para a implantação da Indústria 4.0.												
16.2 O percentual dos dados utilizados que são analisados é adequado para a implantação da Indústria 4.0.												
16.3 A integração com os processos produtivos é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												
16.4 A integração com os clientes é adequada para a implantação da Indústria 4.0.												

Prontidão Tecnológica

17. As ferramentas e características abaixo indicam qual situação a sua empresa se encontra atualmente com relação às novas tecnologias para a Indústria 4.0. Marque com um X a coluna que melhor represente esse cenário:

Tecnologia	Não possui e/ou não realiza	Possui e/ou realiza em fase inicial	Possui e/ou realiza em fase intermediária	Possui e/ou realiza em fase avançada
17.1 Máquinas e equipamentos realizam uso de sensores nos processos				
17.2 Coleta e Análise de Dados				
17.3 Infraestrutura de Tecnologia da Informação e Terminais Móveis				
17.4 Computação e armazenamento em nuvem				
17.5 Sistemas de Informação e Software de Aprendizagem				
17.6 Uso de robôs e/ou braços robóticos				
17.7 Comunicação Machine to Machine				
17.8 Compartilhamento e uso de dados com fornecedores e clientes				
17.9 Uso de Realidade Virtual (Simulação e Gêmeos Digitais)				
17.10 Internet das Coisas (IoT)				
17.11 Big Data				
17.12 Sistemas Ciber Físicos (CPS)				
17.13 Realidade Aumentada (AR)				
17.14 Manufatura Aditiva (AM)				
17.15 Inteligência Artificial (IA)				