

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO DE EMPRESAS DE SÃO PAULO

PAULO GOBO JUNIOR

**UM MODELO DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 APLICADO NA CADEIA DE
SUPRIMENTOS**

SÃO PAULO

2020

PAULO GOBO JUNIOR

**UM MODELO DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 APLICADO NA CADEIA DE
SUPRIMENTOS**

Trabalho aplicado apresentado à Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Gestão para a Competitividade.

Linha de pesquisa: *Supply Chain*

Orientador: Prof. Dr. Luís Henrique Rigato Vasconcellos

SÃO PAULO

2020

Gobo Junior, Paulo.

Um modelo de maturidade da indústria 4.0 aplicado na cadeia de suprimentos /
Paulo Gobo Junior. - 2020.
142 f.

Orientador: Luis Henrique Rigato Vasconcellos.

Dissertação (mestrado profissional MPGC) – Fundação Getulio Vargas, Escola
de Administração de Empresas de São Paulo.

1. Logística empresarial. 2. Internet das coisas. 3. Inovações tecnológicas. 4.
Indústria automobilística. I. Vasconcellos, Luis Henrique Rigato. II. Dissertação
(mestrado profissional MPGC) – Escola de Administração de Empresas de São
Paulo. III. Fundação Getulio Vargas. IV. Título.

CDU 658.86/.87

PAULO GOBO JUNIOR

**UM MODELO DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 APLICADO NA CADEIA DE
SUPRIMENTOS**

Trabalho aplicado apresentado à Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Gestão para a Competitividade.

Linha de pesquisa: *Supply Chain*

Orientador: Prof. Dr. Luís Henrique Rigato Vasconcellos

Data da aprovação: ____/____/____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luís Henrique Rigato Vasconcellos
(Orientador)
FGV-EAESP

Prof. Dr. Luiz Carlos Di Serio
FGV-EAESP

Prof. Dr. Fabiano Rodrigues
ESPM-SP

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo e Aparecida, pois sempre me incentivaram a estudar e a acreditar que a educação é o meio responsável pelo nosso crescimento e por nos tornamos melhores seres humanos (pessoal e profissionalmente). Também dedico à minha esposa, Odília, pelo apoio incondicional e pela compreensão infundável durante minha ausência devido aos momentos de estudo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, maior fonte de força espiritual que o homem conhece e exemplo mais nobre de um desejo de tudo dar sem nada pedir em troca, agradeço pelo suporte e pela inspiração recebidos durante os momentos de grande dificuldade e de tribulações vivenciados em todas as fases de elaboração deste trabalho.

À minha esposa, pelo incentivo ao meu aprimoramento intelectual. Agradeço pela compreensão e pela paciência que demonstrou durante a elaboração deste trabalho, nunca deixando de me incentivar para continuar em frente.

A toda minha família, agradeço pela compreensão quando não pude me fazer presente em certos momentos, dando total apoio para que eu pudesse concluir mais esta jornada em minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luís Henrique Rigato Vasconcellos, agradeço pelo incentivo durante o processo de pesquisa e pelos direcionamentos valiosos para a execução deste trabalho. O seu suporte foi essencial.

A todos os professores e à coordenação da FGV/EAESP – MPGC – linha de pesquisa *Supply Chain*, agradeço pelo compartilhamento de conhecimentos na busca de meu desenvolvimento acadêmico.

Ao meu colega de sala, Lucas Lippi, agradeço pelo auxílio irrestrito. Sem seu apoio e sua parceria, não seria possível realizar este trabalho.

À minha colega de estudos, Jaci Brasil Tonelli, agradeço pela incondicional parceria no auxílio sobre o entendimento dos conceitos acadêmicos necessários para a elaboração deste trabalho.

Aos colegas de sala, pelo enriquecimento de conhecimento, pelo compartilhamento de ideias e de experiências e pela amizade desenvolvida neste período.

RESUMO

Com a chegada da Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0, inicia-se a discussão sobre as redes globais de máquinas e equipamentos em um ambiente de fábricas inteligentes, capazes de trocar informações de forma independente, em tempo real, e tendo a Internet das Coisas e os sistemas ciberfísicos como responsáveis por garantir que operem de forma realmente autônoma. Esse contexto possibilita ganhos em produtividade e flexibilidade, intensificando, dessa forma, a competitividade global, as mudanças na sociedade e o desenvolvimento econômico de uma região ou nação; além disso, estimula a construção de novos trabalhos acadêmicos, como a proposição de modelos capazes de identificar o nível de maturidade de uma indústria no contexto 4.0. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de maturidade que analise a indústria no contexto 4.0, possibilitando a identificação do grau de homogeneidade existente entre os participantes de uma cadeia de suprimentos. Para tanto, em um primeiro momento, realizou-se uma revisão de literatura contextualizando as características, os componentes relevantes e os modelos existentes de maturidade para a Indústria 4.0. Com base nas pesquisas já realizadas, foi construído um modelo estruturado, suportado por questionário, e validado por especialistas nos conceitos de melhoria contínua da indústria automotiva. O modelo desenvolvido foi aplicado em três empresas fabricantes de autopeças na região da Grande São Paulo (SP) e em pelo menos um de seus fornecedores relevantes em suas cadeias de suprimentos, obtendo como principal resultado as diferenças encontradas nos níveis de maturidade das empresas nas seis dimensões utilizadas no modelo proposto e possibilitando um entendimento relacionado aos diferentes graus de homogeneidade identificados entre os membros dessas cadeias de suprimentos, bem como o motivo desses desbalanceamentos. A partir das análises dos dados, verificou-se que as empresas apresentaram notas baixas na maior parte das seis dimensões do modelo, atingindo, no máximo, nota 3 na escala Likert em apenas algumas delas. O resultado obtido pela análise das respostas do questionário demonstra um baixo nível de implementação da metodologia da Indústria 4.0, uma baixa predisposição para investimento nessas tecnologias, bem como a falta de entendimento sobre as possibilidades de ganhos e oportunidades de melhorias que a Indústria 4.0 pode proporcionar à cadeia de suprimentos.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Internet das Coisas. Sistemas ciberfísicos. Cadeia de suprimentos. Nível de maturidade. Grau de homogeneidade.

ABSTRACT

With the arrival of the Fourth Industrial Revolution, also known as Industry 4.0, the discussion about global networks of machines and equipment begins in an environment of intelligent factories, capable of exchanging information independently, in real time, and having the Internet of Things and Cyber-Physical Systems as responsible for ensuring that they operate in a truly autonomous manner. This context allows gains in productivity and flexibility, thus intensifying global competitiveness, changes in society and the economic development of a region or nation, in addition to stimulating the construction of new academic works, such as the proposal of models capable of identify the maturity level of an industry in the 4.0 context. In view of this scenario, the objective of this work is to develop a maturity model that analyzes the industry in the 4.0 context, enabling the identification of the degree of homogeneity that exists between the participants of a supply chain. To this end, at first, a literature review was carried out, contextualizing the characteristics, relevant components and existing models of maturity for Industry 4.0. Based on these surveys already carried out, a structured model was built, supported by a questionnaire, which was validated by members specialized in the concepts of continuous improvement in the automotive industry. The model developed was applied in three auto parts companies, in the Greater São Paulo (SP) region, and in at least one of their relevant suppliers in their supply chains, obtaining as main result the differences found in the companies' maturity levels in six dimensions used in the proposed model and enabling an understanding related to the different degrees of homogeneity identified among the members of these supply chains, as well as the reason for these imbalances. From the analysis of the data, the companies presented low marks in most of the six dimensions of the model, reaching a maximum of 3 in the Likert scale, in only some of the dimensions of the model. The result obtained by analyzing the responses to the questionnaire demonstrates a low level of implementation of the Industry 4.0 methodology, a low willingness to invest in these technologies, as well as a lack of understanding about the possibilities for gains and opportunities for improvement that Industry 4.0 can provide to the supply chain.

Keywords: Industry 4.0. Internet of Things. Cyber-Physical Systems. Supply chain. Maturity level. Degree of homogeneity.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Histórico da evolução da produção industrial ao redor do mundo | 26 |
| Figura 2 – Simulação da manufatura aditiva | 40 |
| Figura 3 – Descrição das etapas do processo de desenvolvimento de um modelo de maturidade | 77 |
| Figura 4 – Estrutura utilizada no desenvolvimento do modelo 4.0 proposto | 80 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 1 – Componentes relevantes da Indústria 4.0 | 34 |
| Quadro 2 – Modelos de maturidade no contexto da indústria 4.0 | 58 |
| Quadro 3 – Descrição e características das dimensões em empresas 4.0 | 85 |
| Quadro 4 – Descrição das etapas do desenvolvimento da pesquisa | 91 |
| Quadro 5 – Exemplo de pergunta do questionário sobre o nível de maturidade na Indústria 4.0 | 92 |
| Quadro 6 – Informações relevantes sobre as empresas respondentes do questionário..... | 95 |
| Quadro 7 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 1 | 98 |
| Quadro 8 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 2 | 101 |
| Quadro 9 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 3 | 103 |
| Quadro 10 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 4 | 106 |
| Quadro 11 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 5 | 107 |
| Quadro 12 – Avaliação dos resultados obtidos com os grupos Tier 1 e Tier 2 | 108 |
| Quadro 13 – Desbalanceamento identificado entre as empresas Tier 1A, 2A, 1B, 2B, 1C e 2C | 111 |
| Quadro 14 – Consolidação das avaliações do questionário das empresas Tier 1A e Tier 2A | 114 |
| Quadro 15 – Consolidação das avaliações do questionário das empresas Tier 1B e Tier 2B | 115 |
| Quadro 16 – Consolidação das avaliações do questionário das empresas Tier 1C e Tier 2C | 116 |
| Quadro 17 – Ações relacionadas a melhoria dos níveis de implementação e aos estágios de maturidade das empresas participantes | 118 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Descrição do gráfico de radar 1 | 98 |
| Tabela 2 – Descrição do gráfico de radar 2 | 101 |
| Tabela 3 – Descrição do gráfico de radar 3 | 103 |
| Tabela 4 – Descrição do gráfico de radar 4 | 106 |
| Tabela 5 – Descrição do gráfico de radar 5 | 107 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 1A e Tier 2 A..... | 98 |
| Gráfico 2 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 1B e Tier 2B | 100 |
| Gráfico 3 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 1C e Tier 2C | 103 |
| Gráfico 4 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 1A, Tier 1B e Tier 1C | 105 |
| Gráfico 5 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 2A, Tier 2B e Tier 2C | 107 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – *Anti-lock Braking System*

ACATECH – The National Academy of Science and Engineering

AI – *Artificial Intelligence*

AM – *Additive manufacturing*

AR – *Augmented reality*

AVG – *Automated guided vehicles*

BCG – Boston Consulting Group

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CAD – *Computer Assisted Drawing*

CAD 3D – *Computer Assisted Drawing 3 Dimensions*

CBDM – *Cloud-Based Design and Manufacturing*

CM – *Cloud Manufacturing*

CMMI – *Capability Maturity Model Integration*

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CNE – Conselho Nacional de Educação

CPPS – *Cyber-Physical Production Systems*

CPS – *Cyber-Physical Systems*

DoE – Department of Energy

DREAMY – *Digital Readiness Assessment Maturity Model*

DSR – *Design Science Research*

ENISA – European Network and Information Security Agency

ERP – *Enterprise Resource Planning*

ES – *Energy savings*

ESP – *Eletronic Stability Program*

FEMS – *Factory Energy Management System*

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

IA – Inteligência artificial

IaaS – *Infrastructure as a Service*

ICT – *Information-Communication Technology*

IEC – International Electrotechnical Commission

Infosys – *Information System Consulting*

IoP – *Internet of Persons*

IoS – *Internet of Service*

IoT – *Internet of Things*

ISO – *International Standardization Organization*

IT – *Information Technology*

IWNs– *Industrial Wireless Networks*

M2DDM – *Maturity Model for Data-Driven Manufacturing*

M2M – *Machine to machine*

MDIC – *Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços*

MIS – *Management Information Systems*

MIT – *Massachusetts Institute of Technology*

MM – *Maturity model*

MVMM – *Manufacturing Value Modeling Methodology*

NIST – *National Institute of Standards and Technology*

NTP – *National Technology Platform*

OEM – *Original equipment manufacturer*

P2P – *Perr to Perr*

PaaS – *Platform as a Service*

PLM – *Product Lifecycle Management*

RAMI 4.0 – *Reference Architectural Model for Industrie 4.0*

RFID – *Radio Frequency Identification*

SaaS – *Software as a Service*

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*

SCM – *Supply Chain Management*

SDN – *Software Defined Networks*

SDM – *Supply-Demand Matching*

SDMS – *Supply-Demand Matching Simulator*

SEI – *Software Engineering Institute*

SF – *Smart factories*

SI – *Smart infrastructure*

SMMI 4.0 – *System Integration Maturity Model Industry 4.0*

SP – *Smart products*

SPICE – *Software Process Improvement and Capability Determination*

SS – *Smart sensors*

TI – *Tecnologia da informação*

VISTRA – *Virtual Simulation and Training*

VR – *Virtual reality*

WM4.0 – *Toolbox Workforce Management 4.0*

WNs – *Wireless Networks*

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 A Indústria 4.0 e os modelos de maturidade | 17 |
| 1.2 Gestão da cadeia de suprimentos | 18 |
| 1.3 Impactos da Indústria 4.0 nas cadeias de suprimentos | 20 |
| 1.4 Tema, questão e objetivos de pesquisa | 23 |
| 1.4.1 Tema | 23 |
| 1.4.2 Questões de pesquisa | 23 |
| 1.4.3 Objetivo geral | 23 |
| 1.4.4 Objetivos específicos | 24 |
| 2 Indústria 4.0 | 24 |
| 2.1 Evolução histórica das Revoluções Industriais | 25 |
| 2.2 Desenvolvimento da Indústria 4.0 | 27 |
| 2.3 Características gerais da Indústria 4.0 | 29 |
| 2.4 Impactos da Indústria 4.0 | 31 |
| 2.5 Componentes relevantes da Indústria 4.0 | 33 |
| 2.5.1 Sistemas ciberfísicos | 38 |
| 2.5.2 Manufatura aditiva, Realidade aumentada e Realidade virtual | 39 |
| 2.5.3 Internet das Coisas | 41 |
| 2.5.4 Impactos da Internet das Coisas | 43 |
| 2.5.5 Grandes dados e análise de grandes dados | 44 |
| 2.5.6 Segurança de informações | 46 |
| 2.5.7 Manufatura nas nuvens | 47 |
| 2.5.8 Redução no consumo de energia | 49 |
| 2.5.9 Infraestruturas inteligentes | 49 |
| 2.5.10 Integração vertical, integração horizontal e integração de ponta a ponta | 51 |
| 2.5.11 Gerenciamento do ciclo de vida do produto | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5.12 Perfil do novo profissional 4.0..... | 52 |
| 2.6 Modelos de maturidade existentes em domínios relevantes..... | 54 |
| 2.7 Modelos de maturidade no contexto 4.0 | 56 |
| Fonte: Elaboração própria (2020) | 65 |
| 2.7.1 Modelo WM4.0 (<i>Toolbox Workforce Management 4.0</i>) | 66 |
| 2.7.2 Modelo DREAMY (<i>Digital Readiness Assessment Maturity Model</i>) | 66 |
| 2.7.3 Modelo <i>Industrie Maturity Index</i> | 67 |
| 2.7.4 Modelo MM (<i>Maturity Model Industry 4.0</i>)..... | 68 |
| 2.7.5 Modelo M2DDM (<i>Maturity Model for Data-Driven Manufacturing</i>) | 69 |
| 2.7.6 <i>The IoT Technological Maturity Model</i> | 69 |
| 2.7.7 Modelo SMMI 4.0 (<i>System Integration Maturity Model Industry 4.0</i>) | 69 |
| 2.7.8 Modelo <i>Industry 4.0 Maturity</i> | 70 |
| 2.7.9 Modelo <i>Digital Maturity 4.0</i> | 71 |
| 2.7.10 Modelo MVMM (<i>Manufacturing Value Modeling Methodology</i>) | 71 |
| 2.7.11 Modelo IMPULS (<i>Industry 4.0 – Readiness</i>) | 72 |
| 2.7.12 Modelo <i>IT Architecture, Capabilities, IoT in SCM Domain</i> | 73 |
| 2.7.13 Modelo <i>Architecture and Maturity Levels for CPS</i> | 73 |
| 2.7.14 Modelo MMI4 (<i>Maturity Model for Industry 4.0</i>)..... | 74 |
| 2.7.15 Proposta de Modelo de Maturidade da Indústria 4.0 (<i>An Industry 4.0 Maturity Model Proposal</i>)..... | 74 |
| 2.8 Análise dos modelos de maturidade da Indústria 4.0 existentes em domínios relevantes | 75 |
| 2.9 Metodologia de desenvolvimento do modelo proposto | 77 |
| 2.10 Proposta de modelo de maturidade 4.0 para identificação do grau de homogeneidade entre os membros de uma cadeia de suprimentos..... | 82 |
| 3 METODOLOGIA | 87 |
| 3.1 Definições e adequação de abordagem..... | 87 |
| 3.2 Tipos de pesquisa | 89 |

| | |
|--|-----|
| 3.3 Caracterização da pesquisa | 90 |
| 3.4 Etapas da pesquisa | 91 |
| 3.4.1 Etapa 1 – Desenvolvimento do modelo de maturidade | 91 |
| 3.4.2 Etapa 2 – Proposição do instrumento de pesquisa | 92 |
| 3.4.3 Etapa 3 – Aplicação do instrumento de pesquisa/coleta de dados..... | 93 |
| 3.4.3.1 <i>Caracterização das empresas no contexto da Indústria 4.0</i> | 94 |
| 3.4.4 Etapa 4 – Critérios de análise dos dados..... | 96 |
| 4 ANÁLISE DOS DADOS | 96 |
| 4.1 Análise detalhada da maturidade das empresas participantes Tier 1A e Tier 2A | 97 |
| 4.2 Análise detalhada da maturidade das empresas participantes Tier 1B e Tier 2B | 100 |
| 4.3 Análise detalhada da maturidade das empresas participantes Tier 1C e Tier 2C | 102 |
| 4.4 Análise comparativa da maturidade das empresas Tier 1A, Tier 1B e Tier 1C | 105 |
| 4.5 Análise comparativa da maturidade das empresas Tier 2A, Tier 2B e Tier 2C | 106 |
| 4.6 Avaliação dos resultados obtidos entre os grupos de Tiers 1 e 2 | 107 |
| 4.7 Identificação do grau de homogeneidade dos membros das cadeias de suprimentos avaliadas | 110 |
| 4.8 Identificação de possíveis desbalanceamentos e suas prováveis causas | 111 |
| 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 112 |
| 5.1 Síntese dos resultados | 112 |
| 5.2 Conclusões finais | 119 |
| 5.3 Limitações | 121 |
| 5.4 Contribuições do trabalho para as práticas gerenciais | 123 |
| REFERÊNCIAS | 125 |
| APÊNDICE A – Questionário | 136 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 A Indústria 4.0 e os modelos de maturidade

A Indústria 4.0 e seus temas relacionados têm gerado grande demanda de estudos e pesquisas no meio acadêmico, empresarial, econômico e até mesmo social, dada a crescente quantidade de artigos publicados e de discussões sobre esse contexto, a partir de 2011, quando o conceito foi criado. As pesquisas tratam principalmente da busca pela melhoria contínua dos processos, baseada no aumento da produtividade, na redução de custos operacionais, na maior rentabilidade financeira e no quesito social, havendo, nesse sentido, uma preocupação basicamente relacionada às alterações no mercado de trabalho (HOFMANN; RÜSCH, 2017; THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

Destaca-se a importância da Indústria 4.0 no âmbito social, pois ela está relacionada à geração de empregos e de renda no cenário econômico, principalmente quando considerado o nível de investimentos que é praticado globalmente nessa direção. Como exemplo, podem ser citados países como a Alemanha, com investimentos de cerca de 2,5 bilhões de euros; os Estados Unidos, com aproximadamente 496 bilhões de dólares; a China, com cerca de 2,7 bilhões de euros; e a Coreia do Sul, que investirá cerca de 972 milhões de dólares até o final de 2020.

Em consonância com o cenário mundial, o governo brasileiro, nesta década, lançou um pacote de 8,6 bilhões de reais como estímulo para as empresas brasileiras se engajarem no contexto da Indústria 4.0. Além disso, o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) destinará cerca de 5 bilhões de reais em créditos; a FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) destinará cerca de 2,5 bilhões de reais, utilizando a Taxa de Juros de Longo Prazo; o Banco da Amazônia liberará 1,1 bilhão de reais; e o MDIC (Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços), destinará cerca de 30 milhões de reais, sendo todos esses recursos destinados ao desenvolvimento das indústrias inseridas nesse cenário (PUPO; SIMÃO, 2018).

Tendo em vista os valores investidos e a grande quantidade de material acadêmico disponível, como os artigos elaborados por Li *et al.* (2017), Rajnai e Kocsis (2018), Liao *et al.* (2017), Wang *et al.* (2016) e Posada *et al.* (2015), o tema Internet 4.0 torna-se ainda mais relevante no cenário mundial atual. Tais investimentos e trabalhos motivam e direcionam o desenvolvimento de novos estudos e de novas pesquisas.

Segundo De Carolis *et al.* (2017), nesse contexto torna-se importante o desenvolvimento de um modelo de maturidade para analisar a situação atual das indústrias que estão buscando se adequar aos conceitos e requisitos da Indústria 4.0. Dessa forma, é possível ter um ponto de partida para que essas indústrias se desenvolvam tecnológica e digitalmente, de modo a identificar o seu nível de maturidade, contribuindo para que os gestores possam entender as oportunidades de avançar tecnologicamente em seus processos, buscando melhorias, novas tecnologias, integração, agilidade, adaptabilidade, flexibilidade, qualidade, sustentabilidade e gestão em tempo real.

Para Thoben, Wiesner e Wuest (2017), o novo conceito de modelo de maturidade dentro da indústria está relacionado a um conjunto de diferentes áreas e departamentos, como cadeias de suprimento, engenharia de manufatura, engenharias elétrica e mecânica, garantia da qualidade, manutenção, tecnologia da informação etc. Sendo assim, na visão desses pesquisadores, para o correto e efetivo desenvolvimento de um trabalho aplicado como este, é mandatório que a pesquisa seja conduzida de forma multidisciplinar, aliando diversas áreas e garantindo que os resultados busquem agregar valor e contribuir para o meio acadêmico, econômico e social da seguinte maneira:

- Meio acadêmico: mapeamento dos componentes da Indústria 4.0;
- Meio econômico: incentivo e motivação das indústrias de manufatura para aderir ao contexto da Indústria 4.0;
- Meio social: ampla divulgação para a sociedade sobre as melhorias previstas dentro do contexto da Indústria 4.0.

1.2 Gestão da cadeia de suprimentos

O termo gerenciamento ou gestão da cadeia de suprimentos (SCM – *Supply Chain Management*) foi criado por Oliver e Webber (1982), com base em estudos prévios de Booz Allen e Hamilton. Segundo esses autores, o SCM descreve uma abordagem relacionada a um fluxo único e contínuo de material, em vez de uma perspectiva direcionada a um conjunto de processos independentes, individuais e funcionais, definindo que uma cadeia de suprimentos é um processo macro, centralizado, completo; uma verdadeira entidade única. Essa ideia opõe-se, portanto, à prática de fragmentação de responsabilidades departamentais nas organizações. A partir do desenvolvimento desse conceito, passou-se a entender que uma cadeia de suprimentos possui realmente uma responsabilidade única e centralizada, contemplando todos os participantes do novo processo (compras, logística, manufatura, armazenagem, distribuição

e vendas), passando a exercer um papel fundamental nas organizações e a ser responsável pelo desenvolvimento e pelo bom andamento das operações das organizações em seus diversos segmentos de atuação.

Desde então, muitos pesquisadores investigam o conceito de gestão de cadeias de suprimentos, estabelecendo as bases teóricas e operacionais atualmente conhecidas. Stock e Boyer (2009), por exemplo, criaram uma definição uniforme acordada em um estudo qualitativo, no qual apresentam a gestão de cadeias de suprimentos como sendo a gestão de um conjunto de relacionamentos internos e externos em empresas, organizações interdependentes e unidades de negócios, contemplando fornecedores de matérias-primas, compras, instalações fabris ou de manufatura, logística, *marketing* e sistemas facilitadores e relacionados ao fluxo de materiais e serviços, bem como questões financeiras, características do produto, armazenamento, distribuição e cliente final, com foco em trazer os benefícios da agregação de valor aos negócios, maximizando a lucratividade por meio da eficiência operacional e buscando a satisfação dos clientes.

O SCM é a sincronização de materiais, informações e fluxos financeiros, a fim de obter ganhos expressivos em termos de tempo de comercialização, agilidade e redução de custos. Desse modo, no atual ambiente de negócios, que é extremamente concorrencial, o SCM tornou-se uma importante fonte de vantagem competitiva para as empresas. Além disso, o SCM também é responsável pelo gerenciamento de relacionamentos em redes múltiplas e complexas de empresas que, embora legalmente independentes, são, na realidade, interdependentes, ou seja, o gerenciamento do desempenho de uma cadeia de suprimentos de maneira eficiente permite que a cadeia global aumente sua competitividade (CHRISTOPHER, 1998).

Atualmente, não são mais as empresas que competem entre si, mas sim as redes ou as cadeias. Dessa forma, o SCM eficaz considera dois tipos de relacionamento organizacionais: a. relações interorganizacionais verticais (entre comprador e vendedor, fornecedor e fabricante) ou horizontais (alianças e parcerias estratégicas) e b. relações intraorganizacionais (entre departamentos de uma mesma empresa ou entre empresas de um mesmo grupo/organização) (SEPPÄNEN; BLOMQVIST; SUNDQVIST, 2007). Ressalta-se que uma cadeia de suprimentos é definida como um sistema de fornecedores, fabricantes, distribuidores, varejistas e clientes, de modo que suas parcerias a tornam uma cadeia de suprimentos mais eficaz, robusta e rentável (FIALA, 2004).

De acordo com Chu e Fang (2006), a maneira como as relações são gerenciadas entre os membros da cadeia de suprimentos pode aumentar significativamente a eficiência e a

eficácia do negócio. Assim, o gerenciamento de relacionamentos interorganizacionais deve ser visto como um elemento governante na estratégia organizacional e que afeta o desempenho das operações.

No entanto, as relações interorganizacionais são complexas e têm sido estudadas em várias abordagens por diferentes níveis de decisão. Por exemplo, a noção de confiança é desenvolvida não somente nas disciplinas de Psicologia, Psicologia social e Sociologia, mas também em estudos de *Marketing*, Administração e Economia, havendo uma grande diferença entre confiança interpessoal e confiança interorganizacional (SEPPÄNEN; BLOMQVIST; SUNDQVIST, 2007).

1.3 Impactos da Indústria 4.0 nas cadeias de suprimentos

Nas últimas três décadas, os sistemas de tecnologia da informação (IT – *Information Technology*) passaram por um progresso revolucionário e significativo que, conseqüentemente, impactou todos os aspectos da vida cotidiana. Uma das mudanças mais radicais foi a alteração na utilização de computadores para a incorporação de dispositivos inteligentes, usando serviços de infraestrutura baseados na computação em nuvem. Esse período é marcado por uma automação integrada por computadores e sistemas de computação onipresentes, conectados a redes sem fio pela internet. Esses desenvolvimentos recentes permitiram não apenas infinitas possibilidades de interconectar seres humanos e máquinas em um contexto de sistema ciberfísico (CPS – *Cyber-Physical System*), com o auxílio da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) e usando informações obtidas de diferentes fontes, mas também comunicações diretas entre máquinas (M2M – *machine to machine*). A implantação desse tipo de rede no ambiente de produção e de operações industriais é denominada Indústria 4.0 (KAGERMANN, 2013).

Segundo Stock e Boyer (2009), a introdução da Indústria 4.0 nos processos de transformação gera também muitos impactos em toda a cadeia de suprimentos, pois com a colaboração entre fornecedores, fabricantes e clientes finais, consegue-se aumentar a transparência e a confiabilidade entre todas as etapas do processo produtivo, principalmente com a introdução da digitalização e da automação de processos em toda a estrutura de gestão da cadeia de suprimentos. Masteika e Cepinskis (2015) defendem que a missão de alcançar a eficiência operacional e a satisfação dos clientes em uma rede de geração e agregação de valor dentro das organizações interdependentes é facilitada por sistemas de tecnologia da informação e comunicação (ICT – *Information-Communication Technology*), identificando

dois grandes avanços recentes nesse campo: a IoT e o CPS, que são de importância fundamental e específica para a gestão da cadeia de suprimentos.

Tanto a IoT quanto o CPS estão modificando profundamente os modelos de negócios e suas cadeias de suprimentos resultantes, de uma maneira única e sem precedentes, desencadeando, dessa forma, uma quarta revolução industrial, sendo esse fenômeno denominado como Indústria 4.0 (LEE *et al.*, 2015). Esse atual momento da indústria possui como característica principal o conjunto de recursos automáticos de autoconfiguração, autoajuste e auto-otimização, que possibilitam a operação de processos mais ágeis, flexíveis e econômicos, assegurando, dessa forma, uma maior satisfação dos clientes, com produtos conectados e inteligentes, e agregando valor a novos serviços orientados a dados.

Brynjolfsson e Hitt (2000) e Bharadwaj (2000) evidenciam tanto nas formas empíricas como econométricas que existem vínculos atrelando as capacidades de ICTs à maturidade das cadeias de suprimentos. Nessa mesma linha de raciocínio, McCormack, Ladeira e Oliveira (2008) identificam essa conexão também relacionada ao desempenho dos negócios nas organizações, reforçando a ênfase dada ao argumento de que as fortes tendências atuais com foco na IoT e no CPS proverão ainda mais produtividade e sucesso aos negócios.

O conceito de maturidade pode também ser usado para fins descritivos, prescritivos e/ou comparativos, segundo Roglinger, Poppelbub e Becker (2012), servindo a uma finalidade descritiva, se aplicado a avaliações de como estão; a uma finalidade prescritiva, se usado para estabelecer um caminho de desenvolvimento desejável; e a uma finalidade comparativa, se usado para *benchmarking* interno ou externo. Assim, os modelos de maturidade tornaram-se ferramentas adequadas para:

- Documentar o *statu quo* de uma organização;
- Desenvolver uma visão corporativa para a excelência do processo;
- Fornecer orientações sobre o caminho de desenvolvimento;
- Comparar recursos entre unidades de negócios e organizações.

Reconhecendo essas mudanças no ambiente de negócios, a demanda por conceitos de gerenciamento de cadeias de suprimentos que reflitam os desafios e as oportunidades emergentes da Era Digital à nossa frente aumentou. Portanto, as ferramentas e os processos de melhores práticas que foram desenvolvidos nas últimas décadas precisam ser reavaliados e refinados. Os modelos de maturidade, por exemplo, são ferramentas adequadas para

identificar e depois criar os recursos necessários para a produção de uma cadeia de suprimentos inteligente. Em geral, os modelos de maturidade descrevem padrões típicos no desenvolvimento de recursos. Todos os modelos são construídos com a hipótese de que a evolução organizacional segue um padrão previsível de estágio por estágio (ISOHERRANEN; KARKKAINEN; KESS, 2015), com cada estágio representando certo nível de maturidade. Via de regra, os estágios posteriores são superiores aos anteriores, com o nível mais alto denotando estado de excelência (RAO; METTS, MONGE, 2003).

Esses estágios de maturidade podem ser aplicados a vários domínios, como unidades de negócios ou processos específicos, que podem ser considerados dimensões do modelo (Fraser *et al.*, 2002). As dimensões do modelo representam um campo de aplicação específico. Conhecer o estágio de maturidade no respectivo campo de aplicação é essencial para identificar oportunidades em potencial e estimular um processo de melhoria contínua (ISOHERRANEN; KARKKAINEN; KESS, 2015). Consequentemente, os modelos de maturidade aprimoram a excelência organizacional e ajudam as empresas a lidar com a crescente dinâmica do mercado global.

As primeiras manifestações dos modelos de maturidade ocorreram na década de 1970 e foram enraizadas na engenharia de *softwares*, com o conceito de maturidade evoluindo para uma ferramenta importante na prática de negócios entre as organizações (NOLAN, 1973; VAN LOOY *et al.*, 2013). Para entender as oportunidades e as possíveis ameaças da introdução dessas novas tecnologias, é necessário analisar o impacto da Indústria 4.0 na cadeia de suprimentos de forma ampla, identificando o nível de maturidade 4.0 que cada membro da cadeia apresenta.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de maturidade teoricamente fundamentado para identificar o grau de homogeneidade existente entre os membros de uma cadeia de suprimentos, relacionado esse grau ao contexto da Indústria 4.0, o que até então não foi explorado pela literatura disponível, mesmo com sua relevância identificada.

O escopo da análise deste trabalho foi intencionalmente limitado a algumas empresas multinacionais do mercado automotivo e atuantes no segmento de autopeças, localizadas na região da Grande São Paulo (SP), e em pelo menos um de seus fornecedores relevantes. Espera-se que os resultados desta pesquisa ajudem a dar base para traçar o caminho de identificação de um cenário amplo, possibilitando a realização de análises mais aprofundadas dos impactos da Indústria 4.0 em uma cadeia de suprimentos.

O restante deste material está estruturado em tópicos. No tópico 1, foi feita a introdução à temática da pesquisa e foram apresentados seus objetivos. O tópico 2 fornece o embasamento teórico sobre a Indústria 4.0, seu surgimento, suas características gerais, seu desenvolvimento ao longo do tempo e seus componentes relevantes. Nele apresentam-se, também, os modelos de maturidade existentes e relevantes nesse domínio. O tópico 3, por sua vez, descreve a metodologia aplicada, documenta o desenvolvimento do modelo, detalha o instrumento de pesquisa, apresenta os dados obtidos e os critérios de análise. Em seguida, o tópico 4 possibilita a identificação do grau de homogeneidade dos membros de uma cadeia de suprimentos, bem como seus possíveis desbalanceamentos e suas prováveis causas. E finalmente, o tópico 5 fornece as conclusões finais sobre o trabalho, discutindo suas limitações e trazendo sugestões de contribuição da pesquisa para o meio acadêmico e empresarial.

1.4 Tema, questão e objetivos de pesquisa

1.4.1 Tema

O tema deste trabalho aplicado é o desenvolvimento de um modelo para avaliação da maturidade de empresas de manufatura que possibilite a identificação do grau de homogeneidade entre os membros de uma cadeia de suprimentos no contexto da Indústria 4.0.

1.4.2 Questões de pesquisa

As empresas que compõem uma cadeia de suprimentos apresentam diferentes níveis de maturidade no contexto da Indústria 4.0? É possível afirmar que há uma homogeneidade entre os participantes de uma cadeia em relação a esse conceito? Por quê?

1.4.3 Objetivo geral

Identificar o grau de homogeneidade entre os membros de uma cadeia de suprimentos por meio do desenvolvimento de um modelo estruturado e suportado empiricamente por questionário, para a avaliação do nível de maturidade das indústrias de manufatura no contexto da Indústria 4.0.

1.4.4 Objetivos específicos

- Explorar referenciais teóricos que abordem os conceitos fundamentais da Indústria 4.0;
- Identificar as características, os componentes e os modelos de maturidade existentes e relevantes relacionados à Indústria 4.0;
- Ampliar a visão predominante da tecnologia sobre os atuais modelos de avaliação de maturidade, considerando também aspectos organizacionais, econômicos e sociais;
- Definir e caracterizar um conjunto de dimensões relacionadas à Indústria 4.0 que suportem o modelo proposto;
- Testar o modelo proposto em indústrias de manufatura do mercado automotivo pertencentes ao segmento de autopeças e localizadas na Grande São Paulo (SP) e em pelo menos um de seus fornecedores relevantes.

2 Indústria 4.0

Para a realização da análise da literatura de forma sistemática sobre a Indústria 4.0, bem como sobre os modelos de maturidade, utilizou-se o *Methodi Ordinatio*, que segundo Pagani, Kovalski e Resende (2015), basicamente consiste na classificação dos artigos de maior significância e relevância relacionados ao tema. A seguir, é demonstrada a sequência utilizada para realização da revisão da literatura:

- Selecionar as bases de dados a serem pesquisadas;
- Definir as palavras-chave, com a possibilidade de realizar combinações;
- Executar buscas em bases de dados definidas;
- Excluir artigos em duplicidade;
- Excluir artigos com temas não relacionados à pesquisa;
- Classificar os artigos segundo o *Methodi Ordinatio*;
- Realizar a leitura e análise dos artigos selecionados.

Ainda durante a pesquisa, foram realizadas combinações de palavras-chave relacionadas à Indústria 4.0 e ao seu nível de maturidade, conforme mostrado a seguir: *Industry 4.0*; *Industrie 4.0*; *Advanced Manufacturing*; *Industrial Internet*; *Smart Manufacturing*; *Fourth Industrial Revolution*; e *Industrie du futur*. Adicionalmente, foram

pesquisados artigos relacionados a modelos de maturidade no contexto da Indústria 4.0, com foco nas seguintes palavras: *Maturity*; *Maturity Model*, *Key Performance*; e *Assessment*.

2.1 Evolução histórica das Revoluções Industriais

A literatura remete a pesquisa à Primeira Revolução Industrial, ocorrida entre os anos de 1760 e 1840, na Inglaterra. Durante essa revolução, houve a substituição gradativa dos processos e métodos artesanais de fabricação por processos e métodos que se utilizavam de máquinas e ferramentas, substituindo-se também biocombustíveis, como a madeira, pela utilização do carvão na geração de vapor como fonte de energia. Essa substituição dos processos e métodos artesanais pelos mecanizados gerou mudanças relevantes no cenário socioeconômico da época, pois todo o processo produtivo até então praticado (exploração da matéria-prima, fabricação e comercialização dos produtos finais), que era, na maioria dos casos, de responsabilidade única do artesão, passou a ser controlado por um padrão/proprietário, administrando todo o processo de fabricação, inclusive com a gestão dos lucros obtidos com as vendas dos produtos (ZARATE *et al.*; SCHWAB, 2016).

Com o passar das décadas, chegando ao final da Segunda Guerra Mundial em 1945, áreas mais específicas como a indústria química, elétrica e siderúrgica, tiveram evoluções mais sensíveis em seus processos. Concebeu-se, assim, a Segunda Revolução Industrial, com uma forte parceria entre os conceitos de inovação e invenção (KANJI, 1990). Houve uma revolução no sistema de transporte de cargas e mercadorias, com o desenvolvimento de barcos com seus cascos não mais de madeira, mas sim de aço, e com seus grandes e poderosos motores movidos a vapor. Ainda nesse período, foram criadas as primeiras linhas de produção em série, com possibilidade de produção de altos volumes, garantindo a prática de baixos custos de fabricação e massificando os lucros. Esse período também foi marcado pelo início da gestão da qualidade, focando mais na prevenção do que na detecção.

Entre as décadas entre 1950 e 1970 iniciou-se um novo processo de transformação industrial, definindo o que foi chamado pela literatura de Terceira Revolução Industrial, também reconhecida como Revolução Digital, com a utilização em massa de computadores, semicondutores, rápido processamento de informações e de forma digital, equipamentos automatizados com a utilização de robôs em processos de manufatura, grande expansão da telefonia móvel e da internet. Nessa fase, iniciou-se um período de transição, alterando as relações entre vendedores e compradores para algo mais voltado a um sistema colaborativo entre clientes e fornecedores (RIFKIN, 2012).

Já no início do século XXI, com a utilização de componentes eletrônicos cada vez menores e mais potentes, com o avanço tecnológico da internet a custos cada vez mais atrativos e acessíveis, com a crescente sofisticação de *softwares* e *hardwares*, com o desenvolvimento de novos equipamentos com grande capacidade de processamento de informações, com a possibilidade de aprender de forma colaborativa, de criar grandes redes das “coisas” (IoT) possibilitando-se também uma melhor interação e comunicação, deu-se início a uma nova era de transformação industrial, impactando a competitividade nas indústrias, a sociedade e a economia de forma global e até então nunca vista.

Essa nova revolução foi chamada pelos professores Erik Brynjolfsson e Andrew McAfee do MIT (Massachusetts Institute of Technology) de Segunda Idade da Máquina. Em 2011, na Feira Industrial de Hannover, na Alemanha, iniciou-se, então, o discurso sobre a Indústria 4.0 (DREHER, 2016), e apresentou-se ao público um plano estratégico de busca para a conquista de altas tecnologias industriais até 2020 (*High-Tech Strategy 2020 Action Plan*), com foco no desenvolvimento de fábricas inteligentes (SF – *smart factories*), integrando órgãos governamentais, setor privado e meio acadêmico (KANG *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2016; HOFMANN; RUSCH, 2017).

Figura 1 – Histórico da evolução da produção industrial ao redor do mundo



Fonte: Menezes (2015) – A linha do tempo na Engenharia de Produção

Segundo Tunzelmann (2003), agrega-se valor sempre que revoluções industriais são enfrentadas, submetendo a sociedade a significantes avanços tecnológicos, que são atrelados fortemente às inovações setoriais em termos de tecnologias entrantes, sempre diferenciadas entre si. Considerando-se uma abordagem de como seria uma fábrica no futuro, a

nomenclatura Indústria 4.0 pode ser associada aos termos *Smart Factory*; *Digital Factory*; *Intelligent Factory*; e *Factory of the Future* (MACKENZIE, 2015; BAYGIN *et al.*, 2016).

2.2 Desenvolvimento da Indústria 4.0

Nessa direção, as fábricas ganharam agilidade, flexibilidade, dinamismo e autonomia na tomada de decisões, passando a ser consideradas como fábricas que produzem produtos inteligentes em equipamentos autônomos, utilizando processos inteligentes e que pertencem a cadeias de suprimentos também inteligentes (HUBA *et al.*, 2016), proporcionando, assim, uma crescente atração e interesse sobre a Indústria 4.0 por parte dos pesquisadores, dos agentes governamentais, das indústrias de manufatura e de serviços, dos desenvolvedores de aplicativos e dos fabricantes em geral, principalmente pelo fato de a Indústria 4.0 disponibilizar aos usuários a oportunidade de redução de insumos e de otimização de recursos em seus processos, de aumentar os retornos econômicos e financeiros, além de proporcionar melhorias relevantes de produtividade em seus processos de fabricação e de serviços (LI *et al.*, 2017).

Rajnai e Kocsis (2018) afirmam que todo o processo de mudanças relacionado à Indústria 4.0 está bastante acelerado e contundente, principalmente a partir de 2011, com o aparecimento de tecnologias inovadoras e o surgimento de novos modelos de negócios reorganizando as cadeias de valor e gerando um nível elevado de competição entre as organizações. Porém, o tema Indústria 4.0 não deve ser compreendido apenas como uma evolução tecnológica, pois também possui um contexto voltado à transformação das estruturas organizacionais e da cultura instalada nas indústrias (SCHUH *et al.*, 2017).

Atualmente, as indústrias enfrentam grandes desafios e dificuldades relacionadas à crescente concorrência global, às flutuações, às incertezas do mercado e à demanda por produtos customizados e com ciclo de vida reduzido. Contudo, as indústrias são beneficiadas pelo rápido desenvolvimento tecnológico, abrindo e aumentando as possibilidades de novos negócios e novas tendências, como os *smart processes* e as *smart factories*, criando um cenário extremamente relevante para as indústrias (HOFMANN; RUSCH, 2017).

As premissas e os efeitos relacionados à Indústria 4.0 atraem a atenção e o desejo de muitos países, principalmente pelo foco estratégico na tecnologia e pela alavancagem que essa indústria gera no desenvolvimento de produtos, serviços e processos em geral, não deixando de lado a necessidade de incrementar as competências profissionais dos trabalhadores. Nesse cenário, cada país, dentro de sua cultura, escolhe uma denominação específica para o contexto

da Indústria 4.0, sem, no entanto, perder o foco, que está relacionado ao desenvolvimento tecnológico, como os Estados Unidos, que utiliza o nome Internet Industrial (*Industrial Internet*), Manufatura Avançada (*Advanced Manufacturing*) ou, ainda, Fábrica Inteligente (*Smart Factory*); a China, por sua vez, denomina como Internet +; e a França como Industrie du futur (WANG *et al.*, 2016; KANG *et al.*, 2016; ABRAMOWICZ; AUER; HEATH, 2016).

Em 2015, em Hanover, na Alemanha, foi apresentado o *framework* RAMI 4.0 (*Reference Architectural Model for Industrie 4.0*), reunindo todo um conjunto de normas e padronizações nacionais e internacionais, direcionadas às operações e aos serviços baseados em um ecossistema cibernético, abrangendo toda a cadeia produtiva e assegurando ao sistema um linguajar hierárquico e uma definição clara de arquitetura da gestão do *statu quo* da manufatura (LIMA *et al.*, 2018; VENTURELLI, 2017). Em 2016, a Hungria desenvolveu uma plataforma nacional, a NTP (National Technology Platform), buscando promover o entendimento sobre a Indústria 4.0 no País, lançando também uma pesquisa *on-line* e bem ampla para identificar o estágio das empresas húngaras dentro do contexto da Indústria 4.0 (RAJNAI; KOCSIS, 2018).

Basl (2017) apresenta um estudo realizado pela empresa de consultoria Infosys (*Information System Consulting*) e pela Universidade da Alemanha, por meio do Institute for Industrial Management at the University of Aachen. Nesse material, são avaliadas cerca de 400 empresas em países com bom nível de industrialização, tais como Estados Unidos, França, China, Alemanha e Reino Unido, buscando mapear o nível de maturidade das empresas dentro do contexto da Indústria 4.0. Esse estudo chegou às seguintes conclusões: 85% das empresas entendem o potencial de aumento de eficiência relacionado à implantação da Indústria 4.0; todavia, indo na contramão desse resultado, apenas 15% delas implantaram estratégias para analisar dados em suas máquinas. Por meio dessa pesquisa, conseguiu-se identificar que as empresas focadas no planejamento da melhoria de seus processos, em um horizonte de até cinco anos (2022), estarão seguindo as premissas das funções de interoperabilidade da informação (capacidade de um sistema se comunicar com o outro), bem como a padronização de dados e sua análise avançada. Identificou-se também que apenas 20% dessas empresas devem atingir a plena implantação dos conceitos da Indústria 4.0 até 2020 (BASL, 2017).

Qin, Liu e Grosvenor (2016) demonstram que existem diferenças entre os níveis de inteligência voltada à tecnologia, principalmente no quesito relacionado à tomada de decisões, existindo a possibilidade de classificá-los em níveis baixos e altos de inteligência, de acordo com as seguintes subdivisões: a. nível de controle: utilização de programação digital e de

controle lógico programável; b. nível de integração: baseado no nível de controle, com utilização da IoT e do CPS; e c. nível de inteligência: utilização de dados do *Big-Data Analysis* no nível de integração.

Avaliando esse cenário, torna-se notório que a Indústria 4.0 se transformou em um objetivo estratégico das organizações, até mesmo pelo fato de que elas necessitam permanecer vivas e competitivas no mercado. Outrossim, entende-se que todas as organizações não devem tirar de foco os altos custos de investimento que estão envolvidos no contexto de implantação da Indústria 4.0.

No cenário atual, os sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*), SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), SCM, PLM (*Product Lifecycle Management*) e MIS (*Management Information Systems*) armazenam informações em bases de dados ainda de forma não padronizada, fato esse que dificulta e até mesmo impossibilita que as organizações atinjam os aspectos fundamentais da Indústria 4.0 (LEYH *et al.*, 2016; JAEGER; HALSE, 2017). A considerável variedade de novas tecnologias atreladas a essa tendência global, como a IoT, a conectividade, a automação industrial, o gerenciamento do ciclo de vida do produto, as informações onipresentes, a *cyber security*, a inteligência robótica, a tecnologia semântica (análise de informação) e o *Big-Data* industrial, englobando a computação tradicional (visual), fornecem base de sustentação para as novas iniciativas da Indústria 4.0 (POSADA *et al.*, 2015).

2.3 Características gerais da Indústria 4.0

Buscando a elucidação das características da indústria que atendem ao grau de agilidade e flexibilidade relacionado ao contexto da Indústria 4.0, apresenta-se a seguir a visão de Posada *et al.* (2015); Xu e Hua (2017); Roblek, Mesko e Krapez (2016); Marcon *et al.* (2017); Lu (2017); Xu e Li *et al.* (2017); Hofmann e Rusch (2017) identificando a relevância dessas características na constituição dos componentes da Indústria 4.0. Dessa forma, serão contextualizadas algumas das características que possibilitam a inserção das indústrias no cenário 4.0 (POSADA *et al.*, 2015):

- Produtos fabricados e habilitados por meio de sistemas de tecnologia da informação industrial, adaptando a produção a lotes menores e atendendo as demandas customizadas dos clientes;

- Manufatura flexível, ágil e automaticamente adaptada a eventos não planejados, como interrupções inesperadas nas linhas de produção, reprogramações etc.;
- Rastreabilidade, gerando autogestão e comunicação simultânea entre peças de máquinas, produtos e equipamentos;
- Interação aperfeiçoada entre ser humano-máquina, considerando a existência de robôs, e as novas formas de integração e operação dentro das fábricas inteligentes;
- Ampla utilização da IoT como agente facilitador na otimização da manufatura, gerando a possibilidade de comunicação com as fábricas inteligentes;
- Novos modelos de negócios/serviços, integrando mudanças nas cadeias de valor.

Xu e Hua (2017) completam essas características da seguinte forma:

- Processos altamente correlacionados: ambiente de rede utilizando dispositivos de fabricação, montagem e armazenamento com transmissão de dados, com todos os processos interconectados a múltiplas redes cabeadas ou não (*wireless*), tanto em tempo real como em tempo não real (*delay*), trocando dados e informações entre si;
- Profundo nível de integração: ligação entre sistemas físicos inteligentes (assunto que será abordado nas próximas seções), com plataformas em nuvens;
- Disponibilidade de grande quantidade de dados em tempo real: o *Big-Data Industrial* em execução simultânea com o *Big-Data Analysis* nas fábricas inteligentes;
- Reconfiguração da dinâmica dos sistemas: demanda de múltiplos itens de produtos e de lotes reduzidos, sendo necessária a determinação dos requisitos dos dispositivos, das condições dos equipamentos e do item a ser produzido;
- Fábricas inteligentes atendem a demanda de pequenos lotes e customizados, demonstrando em tempo real o *status* dos equipamentos, o *status* dos processos de fabricação e as informações do produto, gerando o *Big-Data*.

Já Roblek, Mesko e Krapez (2016) e Marcon *et al.* (2017) reforçam que a Indústria 4.0 ainda se encontra em processo de transformação, sendo representada pelas seguintes características:

- Digitalização da produção e dos serviços;
- Automação;

- Atualização e integração da manufatura com a cadeia de suprimentos;
- Relações comerciais;
- Alta gestão.

A Indústria 4.0 se utiliza de recursos como plataforma em nuvens (CM – *Cloud Manufacturing*), coleta e análise de dados com a utilização da *Big-Data* e *Big-Data Analysis* de forma ampla, inclusive para a geração de inovações dentro de seus processos, como sistemas de manutenção preventiva, preditiva e autônoma, otimização de seus processos de fabricação, e até mesmo gestão de consumo de insumos (água, energia elétrica, ar comprimido etc.). Ressalta-se, no entanto, que isso somente é possível com a ampla utilização dos dados armazenados na *Big-Data* da organização (WAN *et al.*, 2017).

Lu (2017) demonstra que dois fatores se sobressaem nesse cenário: a integração e a interoperabilidade. A integração nada mais é do que a troca de informações, conforme exposto anteriormente. Já a interoperabilidade se refere à capacidade de dois sistemas distintos entenderem e analisarem os dados e as informações de forma inteligente, com a possibilidade de utilizarem a funcionalidade um do outro entre si, compartilhando os dados e as informações. Assim sendo, dentro desse contexto, as indústrias inteligentes abrem perspectivas para que novas plataformas, por exemplo, CPS, apoiem os processos colaborativos de fabricação e suas redes associadas de negócios (XU; LI, 2017).

Complementando, há o entendimento de que a Indústria 4.0 abrirá as portas para novas oportunidades, sendo auxiliada pelo CPS e pela IoT, proporcionando a geração de produções em massa e extremamente flexíveis em sua execução, monitoramento e gestão em tempo real. No *supply chain*, haverá ainda a possibilidade de praticar melhores níveis de rastreamento e de manuseio de matéria-prima e ter produtos com melhores níveis de qualidade e sem desperdício de tempo nos processos, otimizando toda a cadeia de valor, reduzindo custos e trazendo à tona novos modelos de serviços e negócios (HOFMANN; RUSCH, 2017). De forma disruptiva, a Indústria 4.0 possibilita que as indústrias se tornem mais capazes e até mesmo autossuficientes, e que seus processos de manufatura se tornem mais eficientes e produtivos, mesmo no que concerne a produções pequenas e customizadas (XU; HUA, 2017).

2.4 Impactos da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 abrange muito mais do que simplesmente processos digitais, pois considera inovações complexas, combinando tecnologias variadas e avançadas,

redirecionando as organizações a reaprender e a repensar a forma como conduzem seus negócios, seus processos e suas premissas gerenciais, até então consideradas como verdades absolutas. Esse redirecionamento também influencia a visão de como as organizações se posicionarão na cadeia de valor dos mercados globais, acarretando mudanças relevantes no departamento de *marketing* quanto ao desenvolvimento de novos produtos e serviços e afetando também toda a cadeia de suprimentos em que estão inseridos.

Schwab (2016), em seu livro *The Fourth Industrial Revolution*, ressalta ser essencial que as organizações tenham a percepção de que as alterações provocadas pela Indústria 4.0 devem realmente ser estendidas a toda a cadeia de suprimentos a que pertencem, indo até os *stakeholders* e possíveis futuros parceiros de seus negócios. Ainda segundo esse autor, são percebidas quatro alterações fundamentais nas organizações em geral: a. elevação do nível de exigência dos clientes; b. geração de produtos mais rentáveis, inteligentes e mais bem aceitos pelo mercado; c. sistemas de parcerias e colaboração inovadoras; e d. transposição de processos puramente operacionais para processos digitais e inteligentes. Dessa forma, entende-se que os consumidores não buscam apenas por produtos ou serviços, mas também por vivenciar experiências durante o ato dessas aquisições, experiências essas que passam pela identificação da marca e da embalagem, pelo atendimento durante a compra, pelo pós-venda e até mesmo pelo compartilhamento dessas experiências com outros consumidores via redes sociais e digitais.

Dentro desse cenário evolutivo, passou-se da produção em larga escala e padronizada para a produção em larga escala de forma customizada, podendo ser definida como sendo a produção de bens e serviços relacionados a demandas específicas dos indivíduos, sem perder de vista a redução dos custos, pois os consumidores não aceitam pagar algo adicional a aquilo que era pago pelos produtos e serviços massificados e padronizados. Nesse contexto, a Indústria 4.0, com suas premissas de inteligência, flexibilidade, agilidade e dinamismo, oferece suporte as organizações na obtenção dos resultados esperados (HOFMANN; RUSCH, 2017).

As tecnologias digitais e inovadoras potencializam os produtos e os serviços, agregando valor à operação e à percepção dos clientes com a utilização de novos materiais e equipamentos inteligentes, monitorando em tempo real e de forma estatística o desempenho dos processos e agindo de forma autônoma na correção dos desvios encontrados, caso ocorram. A geração de sinergia nesse cenário é alavancada pela inovação colaborativa, sendo convertida em vantagem competitiva dentro das organizações, e impulsiona o crescimento e o desenvolvimento socioeconômico. Empresas jovens, com poucos recursos e com perfil

inovador, buscam colaboração e parceria com empresas já bem estabelecidas no mercado, como forma de crescimento e, da mesma forma, as empresas bem estabelecidas buscam parcerias e colaboração com empresas jovens e inovadoras, como forma de agregar mais valor a seus negócios, quebrar alguns paradigmas e sair da zona de conforto em que se encontram, tornam-se mais ágeis, flexíveis, dinâmicas e produtivas (XU; HUA, 2017).

Para Mark Espósito, professor da Business and Economics Extension School da Harvard University, a inovação colaborativa é a próxima etapa a ser desenvolvida nesse processo, possibilitando o surgimento de novos modelos de negócio, que também de forma colaborativa e empreendedora trilham o caminho do sucesso para organizações modernas, que exploram novas oportunidades e demandas do mercado (ASTARLOA *et al.*, 2016).

2.5 Componentes relevantes da Indústria 4.0

As premissas fundamentais da Indústria 4.0 estão basicamente atreladas à melhoria contínua de processos como produtividade, eficiência, segurança, flexibilidade, qualidade de produtos e processos, redução de custos operacionais e ao retorno do capital investido. Nesse cerne, atualmente identificam-se a existência e a tendência de inúmeras tecnologias facilitadoras; neste tópico especificamente, serão abordadas aquelas que são consideradas os mais relevantes pilares da Indústria 4.0, ou Indústria Inteligente, conforme demonstrado no quadro 1.

Quadro 1 – Componentes relevantes da Indústria 4.0

| COMPONENTES | PRINCIPAIS ÁREAS DE APLICAÇÃO | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | AUTORES |
|--|--|--|--|
| <i>Cyber-Physical Systems (CPS)</i> | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação e Análise de Sistemas | O CPS é definido por operar máquinas e equipamentos inteligentes e sistemas de armazenagem de dados em um sistema de manufatura que possua troca de informações de forma autônoma, inteligente e em tempo real. | Posada <i>et al.</i> (2015); Kang <i>et al.</i> (2016); Wang <i>et al.</i> (2016); Thoben, Wiesner e Wuest (2017) |
| <i>Additive Manufacturing (AM), Augmented Reality (AR) e Virtual Reality (VR)</i> <i>Additive Manufacturing (AM), Augmented reality (AR) e Virtual Reality (VR)</i> | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação e Análise de Sistemas Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação e Análise de Sistemas | A Manufatura Aditiva é definida como um grupo de tecnologias que utiliza uma abordagem camada por camada para criar objetos com forma livre, da base ao topo. | Xu e Li (2017); Kang <i>et al.</i> (2016); Burdea e Coiffet (2003); Kirner e Kirner (2011); Azuma (1997); Gibson <i>et al.</i> (2010); Kang <i>et al.</i> (2016) |
| | | A Realidade Aumentada é definida como um sistema que demonstra três características fundamentais, quais sejam: a. permitir a combinação do real com o virtual; b. permitir interatividade em tempo real; e c. permitir o ajuste dos objetos virtuais em um ambiente tridimensional (3D). | |
| | | A Realidade Virtual é definida como uma interface computacional avançada envolvendo simulação em tempo real, suas devidas interações e se utilizando de canais multissensoriais. | |

| COMPONENTES | PRINCIPAIS ÁREAS DE APLICAÇÃO | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | AUTORES |
|-------------------------------------|---|--|---|
| <i>Internet of Things (IoT)</i> | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação e Análise de Sistemas | A IoT é caracterizada pela ampla utilização de sensores e <i>softwares</i> e pela comunicação entre máquinas e equipamentos com as linhas e as células de produção, garantindo a coleta e a troca de dados e informações por meio de sensores inteligente. | Kang <i>et al.</i> (2016) e Wang <i>et al.</i> (2016) |
| Impactos da IoT | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção | A IoT assegura a integração entre várias tecnologias, principalmente no que diz respeito a atividades humanas e aos sistemas de computação como IoP e IoS. | Hofmann e Rusch (2017); Marcon <i>et al.</i> (2017); Conti, Passarella e Das (2017) |
| <i>Big-Data e Big-Data Analysis</i> | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Ciências da Computação e Análise de Sistemas | Relacionado ao desenvolvimento de <i>softwares</i> e de sistemas de captação de dados por meio da IoT. Uma grande quantidade de dados é gerada, devendo ser interpretada e analisada. | Kang <i>et al.</i> (2016) |
| <i>Information Security (IS)</i> | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Ciências da Computação e Análise de Sistemas | Por ser responsabilidade da empresa manter a integridade e a confiabilidade de seus dados e de suas informações, torna-se necessário operar sistemas de segurança de dados contra possíveis ataques cibernéticos. | Freund, Fagundes e Macedo (2017) e Schluga <i>et al.</i> (2018) |

| COMPONENTES | PRINCIPAIS ÁREAS DE APLICAÇÃO | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | AUTORES |
|----------------------------------|--|--|---|
| <i>Cloud Manufacturing</i> (CM) | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Ciências da Computação e Análise de Sistemas | Este conceito se refere ao modo operacional. Os provedores fornecem recursos de fabricação, transformando-os em serviços e agrupando-os em plataformas nas nuvens. O cliente pode acessar essas plataformas e solicitar os requisitos do produto, como <i>design</i> e testes de <i>performance</i> , além de poder gerenciar todas as etapas do ciclo de vida do produto. | Kang <i>et al.</i> (2016) e Li e Xu (2017) |
| <i>Energy savings</i> (ES) | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação, Análise de Sistemas | A <i>smart grid</i> se utiliza de medidores inteligentes capazes de monitorar e controlar o <i>status</i> dos eletrodomésticos. Eles podem se comunicar <i>on-line</i> com outros medidores/controladores, disponibilizando aos clientes um maior e mais eficiente controle sobre seu consumo de energia. Tudo isso em tempo real. | Jirkovisk <i>et al.</i> (2016) e Faheem e Gungor (2017) |
| <i>Smart infrastructure</i> (SI) | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação e Análise de Sistemas | A infraestrutura inteligente possui um sistema descentralizado, pelo fato de rotear a energia, os dados e as informações em tempo real. Possui também a característica de ser centralizada, pois pode gerenciar e controlar o consumo de energia e o fluxo de informações, por meio de diagnóstico robusto. | Weyer <i>et al.</i> (2015); Xu e Li (2017); Roblek, Mesko e Krapez (2016) |

| COMPONENTES | PRINCIPAIS ÁREAS DE APLICAÇÃO | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | AUTORES |
|--|--|--|---|
| <i>Vertical Integration</i> (VI), <i>Horizontal Integration</i> (HI) e <i>End to End Integration</i> (EEI) | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação, Análise de Sistemas. | Integração vertical: possui o pacote de sistemas de produção conectados em rede e o auxílio do CPS na criação de sistemas de fabricação flexíveis e reconfigurados, possibilitando uma integração entre produção, <i>supply chain</i> e <i>Big-Data</i> . | Xu e Li (2017); Leyh <i>et al.</i> (2017); Wang <i>et al.</i> (2016) e Posada <i>et al.</i> (2015) |
| | | Integração horizontal: apresenta a integração de redes geradoras de valor, intensificando o uso da tecnologia para a gestão de dados e informações. | |
| | | Integração digital ou de ponta a ponta (<i>end to end</i>): tem foco na engenharia, no monitoramento das fases do ciclo de vida de um produto, seu <i>design</i> e seus processos de fabricação, até chegar ao cliente final. | |
| <i>Product Lifecycle Management</i> (PLM) | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação, Análise de Sistemas | O PLM é um sistema que monitora, de forma ágil, o ciclo de vida do produto, desde o seu <i>design</i> até seu final de vida, ou seja, sua retirada do mercado. Nesse sentido, é válido explicar que o ciclo de vida de um produto abrange as seguintes etapas: concepção (<i>design</i>); desenvolvimento; ordens de fabricação; manufatura; armazenagem; transporte; reciclagem; e demais serviços agregados. | Stark (2015); Weyer <i>et al.</i> (2015); Rajnai; Kocsis, (2018); De Carolis <i>et al.</i> (2017); Bangemann <i>et al.</i> (2016) |

| COMPONENTES | PRINCIPAIS ÁREAS DE APLICAÇÃO | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | AUTORES |
|--------------------------|--|---|--|
| Novo perfil profissional | Engenharia da Computação, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Ciências da Computação e Análise de Sistemas | O novo perfil profissional exigido pelas indústrias do setor 4.0 será voltado ao desenvolvimento de um pensamento digital, devendo o profissional ter senso de análise crítica e se enquadrar a esse novo modelo. | Roblek, Meskoe Krapez (2016) e Merkel <i>et al.</i> (2017) |

Fonte: Elaboração própria (2020)

2.5.1 Sistemas ciberfísicos

A Indústria 4.0 se desenvolveu e se tornou amplamente conhecida, principalmente pela aplicação de CPS (*Cyber-Physical Systems*), que são sistemas cibernéticos que interagem com *Big-Data*, computação em nuvens, redes de comunicação (com e sem fios), processadores incorporados, *embedded systems* e processos físicos, sendo integrados e influenciados entre si, evoluindo no sentido de proporcionar mais flexibilidade, agilidade, elevada capacidade de processamento de dados e preços baixos e acessíveis. Os CPS permitem sua utilização integrada de forma efetiva e em tempo real (WAN *et al.*, 2017), pois sabe-se que, em pouco tempo, os sistemas de computadores atuais e tradicionais tenderão ao desaparecimento, abrindo a possibilidade de criação de um novo entrante, que utiliza a ideia de *ubiquitous computing* (computação onipresente), ou simplesmente *ubicomp*, que é um conceito utilizado na engenharia de *softwares* e na ciência da computação, focado na utilização da computação em qualquer local e a qualquer momento (WAN *et al.*, 2017).

Preuveneers e Ilie-Zudor (2017) entendem que a Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0) está embasada no CPS, que busca automatizar os processos de fabricação e é fundamentado na coleta, no monitoramento e na análise dos dados e das informações, considerando-se que as operações e tarefas que até então eram de responsabilidade dos computadores utilizados para a coleta de informações vindas dos sistemas automatizados convencionais estão migrando rapidamente para esses novos sistemas com capacidade e desempenho devidamente realinhados para atender as novas demandas e necessidades.

Um dos principais recursos utilizados nesse sistema é o *Big-Data Industrial*, com sua capacidade de coleta, análise e armazenamento de dados e informações em sistemas inteligentes de armazenagem, como as nuvens.

Segundo Wang *et al.* (2016) e Thoben, Wiesner e Wuest (2017), o CPS é um sistema com grande aceitação e boa penetração no meio industrial, mostrando-se como uma grande oportunidade para a obtenção de bons resultados em um ambiente fabril. Esse sistema emprega tecnologias inovadoras com a IoT, sensores sem fio, *Big-Data*, computação nas nuvens, sistemas embarcados e até mesmo internet móvel, assegurando uma perfeita interação entre ser humano e máquina. Posada *et al.* (2015) e Kang *et al.* (2016) ressaltam que o CPS possui a característica básica de utilizar máquinas inteligentes, sistemas de armazenagem e análise de dados e informações em um ambiente de produção que assegura a interação e o compartilhamento de dados e informações de maneira autônoma e inteligente, tendo na eficiência, na flexibilidade e na rapidez na tomada de decisões algumas de suas maiores vantagens competitivas.

De modo amplo, o CPS está sendo utilizado em processos considerados críticos e que necessitam de maior nível de atenção, pois no caso de ocorrerem falhas, podem expor a integridade física das pessoas, como aviões, automóveis, medicina e sistemas nucleares, ou seja, basicamente em ambientes fabris que se utilizam de elevado nível de automação e até mesmo de robôs (RIEL *et al.*, 2017). O CPS possui, também, o monitoramento de processos como um de seus recursos fundamentais, podendo criar uma cópia virtual do mundo físico, auxiliando na tomada de decisões de forma descentralizada, por meio da IoT, e facilitando a cooperação e a comunicação em tempo real entre as máquinas e os colaboradores (XU; LI, 2017).

2.5.2 Manufatura aditiva, Realidade aumentada e Realidade virtual

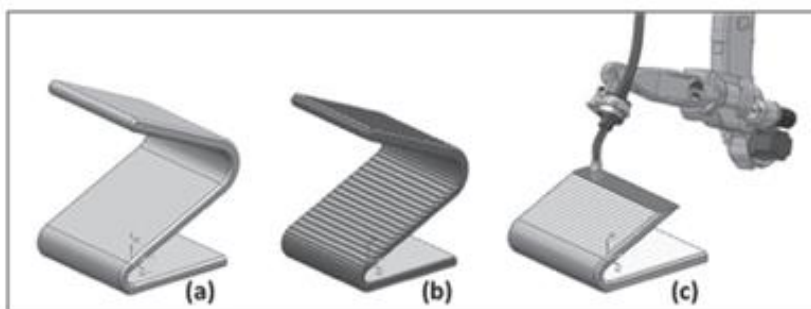
Indo além, há uma grande quantidade de alternativas de tecnologias presentes nas linhas de produção, tais como programas de simulação holográficos, a própria interação entre a Realidade Aumentada (AR – *Augmented Reality*) e a Realidade Virtual (VR – *Virtual Reality*) e a Manufatura Aditiva ou Inteligente com robôs em 3D (MA – *Additive Manufacturing*), que proporcionam um nível de otimização de recursos e de tempo, além da redução de custos operacionais para a fabricação dos produtos e a realização de serviços (XU; LI, 2017; KANG *et al.*, 2016).

Burdea e Coiffet (2003) definem Realidade Virtual como uma interface computacional avançada envolvendo simulação em tempo real, suas devidas interações e se utilizando de canais multissensoriais. De forma mais específica, a Realidade Virtual é considerada uma interface computacional, permitindo que o usuário interaja em tempo real e em um espaço tridimensional gerado por um computador, valendo-se de seus sentidos, por meio de dispositivos específicos (KIRNER; KIRNER, 2011).

Azuma (1997) define Realidade Aumentada como um sistema que demonstra três características fundamentais, quais sejam: a. permitir a combinação do real com o virtual; b. permitir interatividade em tempo real; e c. permitir o ajuste dos objetos virtuais em um ambiente tridimensional (3D). A Realidade Aumentada também pode ser definida como um aprimoramento do mundo real, integrando-o a informações virtuais (imagens dinâmicas, sons espaciais, sensações ao tato) geradas em tempo real por computadores, devidamente posicionadas no espaço tridimensional e percebidas com a utilização de dispositivos tecnológicos (KIRNER; KIRNER, 2011).

A Manufatura Aditiva, por sua vez, é definida como um grupo de tecnologias que utiliza uma abordagem camada por camada para criar objetos com forma livre, da base ao topo. A MA consiste em converter um modelo CAD 3D (*Computer Assisted Drawing – 3 Dimension*), conforme mostrado na figura 2: (a) modelo CAD 3D; (b) divisão do modelo em camadas e, a partir dessa informação, determinação da trajetória (linguagem CNC – Comando Numérico Computadorizado) e dos parâmetros de deposição; e (c) deposição das camadas, que posteriormente são processadas por quatro componentes básicos — controlador CNC, sistema de movimentação, fonte de energia, e um sistema alimentação do material de adição (GIBSON *et al.*, 2010).

Figura 2 – Simulação da Manufatura Aditiva



Fonte: Elaboração própria (2020)

No meio automobilístico, existem alguns exemplos clássicos de CPS, tais como: Sistema de Freio Antiblocante (ABS – *Anti-lock Braking System*); Sistema de Estabilidade

Eletrônico (ESP – *Electronic Stability Program*); e Sistema de Segurança com Bolsas de Ar (*Airbag System*). Nesse âmbito, Wan *et al.* (2017) afirmam que há uma nova geração de veículos guiados de forma autônoma (AGVs – *automated guided vehicles*), que chamam a atenção tanto pelo seu custo acessível de aquisição quanto pelo nível de automação que possuem. Esses AGVs possuem um sistema de mobilidade baseado em localização identificada via laser, satisfazendo, dessa forma, as demandas e os anseios dos usuários. Eles também operam de forma integrada ao sistema de nuvens. Simplificando o conceito, tem-se que: CPS = *Embedded Systems* + ambiente físico.

É de extrema importância que a utilização ampla e generalizada e o impacto desses sistemas descritos anteriormente sejam considerados desde o início do processo de *design* como um fator crítico, buscando a robustez e a disponibilidade necessária durante a operação. Também é necessário que esses sistemas sejam passíveis de intervenção imediata no caso de haver falhas durante a utilização e que sejam seguros para quem os opera, bem como para todos os elementos da cadeia e do meio onde são utilizados. Ainda nesse contexto, está sendo desenvolvido um novo conceito de manufatura sustentável, com foco no aumento da eficiência dos processos, na otimização dos recursos utilizados e na redução dos resíduos gerados, por meio de uma consciência verde, com a utilização de recursos ecologicamente corretos e com a melhora dos processos produtivos (KANG *et al.*, 2016).

2.5.3 Internet das Coisas

De acordo com o exposto na seção anterior, a Internet das Coisas se tornou um dos recursos mais utilizados no CPS, demonstrando grande relevância no contexto da Indústria 4.0. Sua origem se deu no MIT, no início do século XXI, por meio de um grupo que focava no desenvolvimento de um trabalho voltado à área de identificação por rádio frequência conectada (RFID – *Radio Frequency Identification*). Hofmann e Rusch (2017) argumentam que a IoT (*Internet of Things*) possibilitou a expansão de sua aplicação em inúmeras áreas e cenários, sendo até mesmo considerada como a primeira alavancagem para a Indústria 4.0. O entendimento da IoT contempla objetos ligados à internet, tanto físicos como virtuais.

Esse cenário tem sido alavancado pelo surgimento e pela utilização generalizada de sensores inteligentes (SS – *smart sensors*) e *digital twin*, que são relacionados a clones digitais de ativos físicos, *hardwares* cada vez menores, baratos e eficientes, ao avanço da tecnologia que envolve dispositivos de telefonia móvel com suas conexões sem cabos (*wireless*) e à própria tecnologia CM (*Cloud Manufacturing*), além de *softwares* avançados e

poderosos, que asseguram a comunicação entre as máquinas (M2M – *Machine to Machine*) e suas linhas de produção (KANG *et al.*, 2016; WEBER *et al.*, 2017).

A IoT também garante a obtenção de dados e informações em tempo real, com a utilização de sensores e dispositivos inteligentes, possuindo inclusive a capacidade de identificar possíveis falhas nos sistemas, avaliando o cenário, acionando os responsáveis pela manutenção e armazenando o histórico de ocorrência nas nuvens em tempo real (WAN *et al.*, 2017). No entanto, segundo Wan *et al.* (2016), existem desafios a serem explorados na IoT, como identificar o método de configuração para os tipos de rede de forma diferente do meio convencional, que se restringe à atualização dos protocolos individualmente, e definir um *software* que colete, analise e processe todos os dados e todas as informações com clareza e precisão. Nesse sentido, o estudo desse autor indica haver um *software* emergente denominado Redes Definidas por Softwares (SDN – *Software Defined Networks*).

Existem também mecanismos que auxiliam a funcionalidade da IoT, como os conceitos de *gateway* e de mediador, que são recursos técnicos que viabilizam a captação de dados sem fio. Bangemann *et al.* (2016) afirmam que esses recursos conectam entre si diferentes tipos de interface, mapeando protocolos de rede e processando dados e informações, como indicadores de *performance* e de desempenho.

Toda rede *wireless* é composta por considerável quantidade de sensores que possuem a função de medição de parâmetros específicos, como temperatura, ruído, vibração etc. (BANGEMANN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2017). As redes *wireless* se destacam por sua flexibilidade, por sua mobilidade e por garantir a transmissão de dados e informações em tempo real.

De acordo com Li *et al.* (2017), existem dois tipos distintos de redes sem fio, com características também distintas: a rede sem fio industrial (IWNs – *Industrial Wireless Networks*) e a rede sem fio tradicional (WNs – *Wireless networks*). As principais diferenças entre elas são:

- Há preferência pelas redes IWNs, pois elas adotam parâmetros relevantes relacionados ao monitoramento em tempo real dos equipamentos e das linhas de produção diretamente no ambiente de trabalho. Na contramão disso, as WNs perdem espaço pela dependência de fontes de energia, pela dificuldade de acesso aos sensores e pela necessidade de troca de suas baterias;
- As IWNs disponibilizam uma maior quantidade de sensores em movimento, garantindo maior mobilidade de produtos, utilização de robôs, sistemas guiados automaticamente,

veículos e aeronaves. Já as WNs são sistemas estacionários e com possibilidade de movimento limitado;

- Quanto às restrições no ambiente industrial, as IWNs possuem destaque devido à elevada capacidade de adaptação em ambientes agressivos devido a fatores como calor, sujeira e vibração, garantindo a eliminação de interferências ou a perda de sinal, fatos esses que ocorrem com frequência no sistema tradicional WNs;
- Os nós dos sistemas WNs podem finalizar tarefas operacionais cooperando com outros equipamentos; nos sistemas IWNs, no entanto, os sensores operam com métodos complexos, processando, monitorando e armazenando dados e informações.

De acordo com Wollschlaeger, Sauter e Jasperneite (2017) as tecnologias de modo geral e os conceitos relacionados à IoT voltados à automação de processos seguirão com um nível elevado de crescimento e utilização. Nesse cerne, as tecnologias devem ser bem avaliadas e adaptadas quando necessário, de acordo com as demandas emergentes do cenário industrial.

2.5.4 Impactos da Internet das Coisas

Desde 2015, já foram identificados cerca de 13 bilhões de dispositivos devidamente conectados à internet, como *smartphones*, *tablets*, *laptops*, *desktops*, impressoras, veículos, máquinas, equipamentos, entre outros, interagindo com pessoas por meio de processos, dados e informações. Adicionalmente, existe uma previsão de que esse número ultrapasse 25 bilhões de dispositivos conectados em 2020 (MIRANDA *et al.*, 2015).

Diante disso, há o entendimento de que a Internet das Coisas gera impacto no dia a dia das pessoas. Observa-se que a IoT possibilita e garante o acesso a novos caminhos rumo à integração de outras tecnologias, principalmente aquelas relacionadas às atividades humanas atreladas a sistemas avançados de comunicação, como a IoP (*Internet of Persons* – Internet das Pessoas) e a IoS (*Internet of Service* – Internet dos Serviços) (MARCON *et al.*, 2017), que surgiu devido à vasta utilização do conceito de IoT na área industrial, mas focando na área de serviços. A Internet de Serviços disponibiliza serviços e produtos via tecnologia *web* (em rede), permitindo que os usuários criem, combinem e ofereçam novos tipos de serviço, com maiores níveis de valor agregado (HOFMANN; RUSCH, 2017).

A Internet do Futuro consistirá em bilhões de dispositivos digitais, pessoas, serviços e outros objetos físicos com potencial para conectar, interagir e trocar informações de maneira

transparente sobre si mesmos e seu ambiente (DLAMINI; ELOFF; ELOFF, 2009). Além disso, as pessoas utilizarão esses dispositivos digitais e objetos físicos para produzir e consumir serviços da *web*, em um setor de serviços baseado na *web* (HEUSER; ALSDORF; WOODS, 2009).

De acordo com Conti, Passarella e Das (2017), a IoP se refere a um ambiente de rede que possibilita a seus usuários a conexão com suas atividades cotidianas via internet, em combinação com a tecnologia da IoT. Esses usuários podem se conectar a uma grande quantidade de dados e informações de qualquer lugar e a qualquer momento, pois essa rede se caracteriza pela descentralização, não necessitando de provedor local e disponibilizando os dados e as informações aos dispositivos. Esse conceito é denominado rede P2P, ou seja, *Perr to Perr* (ponto a ponto), assegurando que cada dispositivo em utilização assuma o papel de um servidor local. Dessa maneira, cada dispositivo que estiver conectado à rede IoP se comunica independentemente com os demais dispositivos.

Nesse sentido, Roblek, Mesko e Krapez (2016) alegam que com a utilização das tecnologias CPS, IoT e IoS iniciou-se um processo de mudanças no perfil dos consumidores, com a demanda por produtos customizados, contratos personalizados entre clientes e empresas, a utilização de aplicativos para consolidar a prestação de serviços, entre outros.

2.5.5 Grandes dados e análise de grandes dados

Devido à incapacidade do indivíduo comum de processar e de interpretar uma grande quantidade de dados, é necessário que se utilizem sistemas e ferramentas que auxiliem na análise, na interpretação e até mesmo na correta padronização dos dados e das informações, gerando um grande banco de dados (*Big-Data*). O termo *Big-Data* está relacionado a grandes quantidades de dados que são gerados e armazenados instantaneamente como resultado dos milhões de sistemas de informação atualmente conectados a redes (IoT). Esses dados são gerados em tempo real, sobre assuntos diversos, e estão disponíveis em qualquer lugar e a qualquer momento (CHIANG; LU; CASTILLO, 2017).

Com a utilização das tecnologias abordadas anteriormente, torna-se necessário que a indústria armazene seus grandes bancos de dados em um sistema que opere nas nuvens, possibilitando seu acesso em tempo real e em qualquer local. Esse tipo de armazenamento é preciso e se torna um grande aliado das indústrias, pois além de garantir a coleta dos dados e das informações de ponta a ponta, garante sua perfeita sincronização com todos os elementos

da cadeia, ou seja, fornecedores, compradores, vendedores e os próprios clientes (KANG *et al.*, 2016).

No entanto, com o passar do tempo, identificou-se a necessidade de um complemento no conceito de *Big-Data*, pois além da geração, da análise e do armazenamento de grandes quantidades de dados, é preciso garantir que todo o contexto seja devidamente validado, eliminando a possibilidade de distorções que afetem a tomada de decisões pelas organizações. Para atender essa demanda, surge o conceito de *Big-Data Analysis*.

Rezende (2005) argumenta que não só as indústrias, mas também as instituições acadêmicas utilizam uma grande quantidade de dados, principalmente pela relevância que elas possuem dentro do cenário atualmente vivenciado, sendo responsáveis, entre outras coisas, pela avaliação da saúde financeira de empresas e indivíduos, pela definição de novas estratégias corporativas de negócios e por pesquisas voltadas à saúde, à educação, à segurança e ao mercado.

A utilização de *Big-Data* pode ser percebida em todas as áreas e segmentos do mercado global, como a mídia social, abrindo possibilidades para medições e análise de dados via IoT e dispositivos digitais inteligentes. O *Big-Data* possibilita o aumento da capacidade de armazenamento de dados nas nuvens, com a utilização de *softwares* e *hardwares* inteligentes, abrangendo o *Big-Data Analysis*, e auxiliando na tomada de decisões de forma inteligente, por meio da inteligência artificial (IA), da computação cognitiva, das máquinas e dos sistemas que aprendem (CHIANG; LU; CASTILLO, 2017). Segundo Kang *et al.* (2016), com a ampla utilização de novos sistemas e novos *softwares*, garante-se o levantamento, a análise e a interpretação de uma grande quantidade de dados, ações mandatórias para as fábricas consideradas inteligentes. A possibilidade de captação e análise de dados de forma robusta e eficiente proporciona um elevado desempenho para as indústrias, contribuindo até mesmo na fidelização dos clientes, que passam a confiar na qualidade de seus produtos e processos produtivos (SNASEL *et al.*, 2017).

Na literatura relacionada ao *Big-Data*, encontram-se estudos que abordam a *deep learning* (aprendizagem profunda) e como seus conceitos influenciam o *Big-Data*. Segundo Lecun, Bengio e Hinton (2015), a *deep learning* analisa e avalia múltiplos níveis de processamento de dados, sendo capaz de identificar suas representações, ou seja, reconhecer sons, falas, objetos físicos e virtuais, movimentações, entre outros domínios, aproximando-se da inteligência artificial (AI – *artificial intelligence*). Krizhevsky, Sutskever e Hinton (2012) tiveram êxito em seu estudo na tentativa de aumentar a taxa de precisão no reconhecimento de

imagens no *Big-Data*, tendo conseguido atingir uma taxa próxima de 83,6% com a utilização do *deep learning*, contra 74,2% dos métodos tradicionais.

2.5.6 Segurança de informações

De acordo com o observado nas seções anteriores, todo o desenvolvimento tecnológico trazido pela Indústria 4.0 afeta de forma revolucionária toda a sociedade, fundamentalmente a respeito da geração de dados e informações, tornando-se necessários a abordagem e o desenvolvimento de sistemas de segurança de informações (*Information Security – IS*), prevenindo possíveis ataques cibernéticos e garantindo a integridade e a confiabilidade desses dados e dessas informações. Assim sendo, principalmente quando considerados os serviços e dados armazenados em nuvens, os sistemas de segurança de informações devem garantir a integridade desses dados, protegendo os usuários e os provedores que se utilizam desse tipo de serviço. A ISO (International Standardization Organization)/IEC (International Electrotechnical Commission) 2017:2016 define diretrizes que controlam a segurança dos usuários quanto aos serviços em nuvens (FREUND; FAGUNDES; MACEDO, 2017).

As abordagens de estudos relacionados à criptografia leve são extremamente relevantes para aplicação na IoT, fornecendo segurança para as plataformas digitais, com baixa ocupação de recursos e elevado nível de alcance (OZKAYNAK; MUHAMAD, 2017). Nesse ínterim, Riel *et al.* (2017) apresentam em seus estudos um modelo de integração focado no setor automotivo dos quesitos de segurança relacionados à cibersegurança. Esse modelo é baseado no conceito de defesa e devidamente dividido em camadas, possibilitando a identificação de diferentes padrões de ataques de segurança e utilizando um sistema com interface entre *software* e *hardware*, que estabelece os limites e as restrições de confiança relacionados à segurança, tornando-o, dessa forma, aplicável às indústrias globais.

Segundo Schluga *et al.* (2018), é necessário, e até mesmo compulsório, que todas as organizações estejam cientes quanto à potencialidade de riscos relacionados à ocorrência de ataques cibernéticos. Nesse sentido, os principais pontos na segurança de operações são: a. reduzir a vulnerabilidade de suas operações; b. proteger os recursos em uso (computação, dados e informação); c. equilibrar a facilidade de utilização, os controles do sistema, a relevância dos dados e a demanda dos negócios; e d. cumprir a legislação, bem como os aspectos organizacionais.

Seguindo essa abordagem, os usuários de sistemas devem se precaver fortemente quanto aos riscos relacionados à privacidade e à segurança de dados e informações, principalmente no cenário global atual, com diferenças entre leis e culturas sobre a privacidade de dados e informações em outros países (PING; QIANG, 2017). Ainda segundo Ping e Qiang (2017), as indústrias que possuem sistemas de segurança de dados e informações devem assumir a responsabilidade por sua gestão, focando nas cinco atividades fundamentais relacionadas ao risco ao qual estão expostos, quais sejam: a. mapeamento do serviço de *hardwares* e *softwares* da organização; b. levantamento dos riscos técnicos relacionados ao fornecimento de serviços e à própria produção; c. definição de um conjunto de diferentes níveis de riscos; d. monitoramento dos serviços relacionados a *softwares* e *hardwares*, avaliando os riscos de segurança; e e. controle dos riscos inerentes ao processo, possibilitando a verificação e o reparo dos mesmos, sempre que houver a necessidade de intervenção.

Agindo de forma preventiva, a Agência Europeia para a Segurança das Redes e da Informação (ENISA – European Network and Information Security Agency) opera um conjunto de parâmetros destinados à IaaS (*Infrastructure as a Service*), objetivando a avaliação das plataformas em nuvens, bem com dos padrões industriais da própria IaaS de código aberto, como a VMware e a OpenStack, sendo ambas fornecedoras de nuvens privadas e com boa utilização no contexto da Indústria 4.0 (BAUER *et al.*, 2018).

2.5.7 Manufatura nas nuvens

O conceito de *Cloud Manufacturing* (CM) está relacionado ao seu modelo operacional, em que provedores disponibilizam recursos de fabricação, transformando-os em serviços e posteriormente agrupando-os em uma plataforma digital em nuvens. Isso possibilita que os usuários acessem a plataforma na busca dos requisitos dos produtos, como seu *design*, e até mesmo que gerenciem todas as fases do ciclo de vida do produto (XU; LI, 2017).

Bauer *et al.* (2018) afirmam que a computação em nuvens recebeu sua definição pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST – National Institute of Standards and Technology), como sendo um modelo que permite acessos onipresentes à rede, pelos usuários, possibilitando também o compartilhamento de recursos de computação, como servidores, redes, aplicativos, serviços diversos, armazenamento, entre tantos outros. Nesse sentido, de acordo com Ren *et al.* (2017), existem vários modelos de implementação de computação em nuvens, como nuvens privadas (utilizadas por organizações); nuvens públicas (utilizadas por

prestadores de serviço); nuvens híbridas (possibilitam a utilização de dois ou mais tipos de nuvens, porém, operando de forma independente); e nuvens de comunidade (utilizadas no compartilhamento de dados e informações).

Segundo estudos conduzidos pelo International Data Corporation, existia uma estimativa de investimento em 2018 de cerca de 127 bilhões de dólares relacionados a serviços de armazenamento de dados e informações em nuvens (WU; TERPENNY; SCHAEFER, 2017). Na última década, vem crescendo a demanda e a busca por novas tecnologias e novos *softwares* e *hardwares* focados na computação nas nuvens.

Ainda nessa linha, conforme Schluga *et al.* (2018), os recursos conhecidos como IaaS seguem em um considerável ritmo de crescimento, alavancado por sistemas de serviços em nuvens e pela utilização de estratégias de negócios totalmente digitais. A IaaS possui como foco as operações que se utilizam de processos críticos do dia a dia dentro das organizações e as máquinas e as plataformas virtuais que asseguram a confiabilidade de dados e informações, bem como sua integridade e acessibilidade, quando necessário. Porém, além das plataformas IaaS, encontram-se disponíveis no mercado outros serviços em nuvens, como a PaaS (*Platform as a Service*), e o SaaS (*Software as a Service*).

Com a utilização da IaaS, os usuários acessam diretamente seus servidores, seus dados e suas informações armazenadas. Quando comparado a outros tipos de modelos disponíveis de armazenamento em nuvens, o IaaS se mostra mais flexível, garantindo a automatização de servidores, do armazenamento, da rede e da própria capacidade de processamento de dados e informações. Em resumo, o IaaS permite aos usuários um melhor nível de controle de suas infraestruturas, principalmente quando comparado à PaaS e ao SaaS (BAUER *et al.*, 2018).

No cenário da Indústria 4.0, a Manufatura em Nuvens também é amplamente utilizada no *design* e na fabricação dos produtos, por meio do CBDM (*Cloud-Based Design and Manufacturing*), tornando-se um dos maiores pilares do CPS, da IoT e da Industrial Internet. Alguns de seus maiores benefícios são a funcionalidade aprimorada, o elevado nível de acessibilidade, a eficiência relacionada a custos, a segurança no armazenamento de elevado volume de dados e informações, o alto rendimento e a alta flexibilidade (WU; TERPENNY; SCHAEFER, 2017).

A Manufatura nas Nuvens vem sendo utilizada de forma focada no atendimento das demandas dos usuários, que passam a ter a alternativa de configuração de seu produto acessando os recursos de sua manufatura. Nesse cenário, as linhas de produção são compostas por elementos temporários e configuráveis, proporcionando ganhos de eficiência, diminuindo os custos relacionados ao ciclo de vida dos produtos e atendendo as demandas dos usuários,

mesmo que sejam variáveis (KANG *et al.*, 2016). Entende-se que a computação em nuvens é utilizável de formas variadas, pois ela assegura o acesso onipresente e ininterrupto, como em modelagens, simulações, serviços e *softwares* conectados sob demanda.

2.5.8 Redução no consumo de energia

Um dos elementos cruciais e mais relevantes da Indústria 4.0 está relacionado a *Energy Saving* (ES), uma vez que ela é uma das responsáveis por onerar o processo de transformação da matéria-prima em produtos acabados. Wan *et al.* (2017) argumentam que o gerenciamento eficaz e a otimização do consumo de energia possuem papel decisivo e fundamental nas fábricas inteligentes, pois cada vez mais são realizados estudos sobre a aplicabilidade nas indústrias de transformação, como o sistema de gerenciamento de energia nas fábricas (FEMS – *Factory Energy Management System*), que é focado na eficiência dos processos e na análise de dados e informações sobre consumo de energia (KANG *et al.*, 2016).

De acordo com Faheem e Gungor (2017), a Indústria 4.0 também gerou uma revolução no cenário de consumo de energia elétrica, inclusive com a criação do conceito de Rede Elétrica Inteligente, também conhecida como *Smart Grid*. A Rede Elétrica Inteligente possui uma estrutura composta por redes de sensores sem fio, com o objetivo principal de aumentar a eficiência das redes elétricas, apresentando maior flexibilidade de implantação e diminuição dos custos, com a eliminação dos cabos elétricos tradicionais.

As redes *Smart Grid* se utilizam de medidores inteligentes de utilização e de consumo de energia, capazes de monitorar e controlar os eletrodomésticos. Esses medidores também podem se comunicar com outros sistemas de controle e medição, garantindo aos usuários um melhor nível de controle sobre seu consumo de energia elétrica. Ademais, eles apresentam as vantagens de coletar os dados e as informações de consumo em tempo real e de mostrar o *status* dos dispositivos em utilização (JIRKOVSKÝ *et al.*, 2017).

2.5.9 Infraestruturas inteligentes

Na busca por atender as demandas das máquinas, dos equipamentos e dos processos de fabricação na Indústria 4.0, torna-se necessária a utilização de uma *Smart Infrastructure* (SI) devidamente conectada ao sistema em uso. Tal estrutura deve possuir acesso à internet,

disponibilidade de energia, segurança dos dados e das informações e um sistema de comunicação confiável.

Um sistema de infraestrutura inteligente consiste em um sistema descentralizado, que garante o roteamento de energia, dados e informações em tempo real. No entanto, há a possibilidade de o sistema ser centralizado, utilizando-se de métodos de diagnóstico (WEYER *et al.*, 2015), para que o produto seja parte do sistema, com dados e informações devidamente armazenados, de modo que os próprios produtos solicitem esses recursos no caso de serem necessários. Entende-se que no futuro os sistemas de manufatura se tornarão modulares e com múltiplos fornecedores na cadeia, sendo necessário um forte acompanhamento de cada etapa do processo, como rastreamento, monitoramento, controle e processamento de dados e informações.

Os sistemas de infraestrutura se tornarão flexíveis e se adaptarão com a finalidade de garantir o atendimento aos diversos tipos de demandas de produto, como *design* e tamanho de lote, de acordo com as necessidades dos usuários ou clientes. Acredita-se que nesse novo cenário das indústrias, quesitos como percepção, análise, decisão e controle devem se sobrepor para garantir o atendimento dos requisitos dos produtos em tempo real, sendo essa ideia aplicada também ao desenvolvimento de novos produtos (WAN *et al.*, 2016).

Buscando a adaptação e o atendimento das demandas dos clientes, faz-se necessário possuir um sistema de rastreabilidade de produtos bastante robusto. Dessa necessidade, surge o conceito de produtos inteligentes (SP – *smart products*), que podem estar relacionados a simples objetos, a dispositivos, a máquinas e a equipamentos com sensores, todos devidamente controlados com a utilização de *softwares, hardwares e sensores inteligentes* conectados à internet (XU: LI, 2017).

Para Roblek, Mesko e Krapez (2016), tanto *microchips* como sensores passarão a fazer parte dos produtos inteligentes, garantindo que haja uma perfeita integração com a IoT e assegurando um bom nível de monitoramento e de rastreabilidade dos produtos. Dentro desse contexto, faz-se necessária a utilização de plataformas que gerenciem o sistema de infraestrutura inteligente. No cenário da Indústria 4.0, Tao *et al.* (2017) adaptaram uma plataforma já existente, denominada SDM (*Supply-Demand Maching*), buscando atender as novas demandas e as aplicações da tecnologia da Indústria 4.0. Essa nova plataforma foi batizada de SDMS (*Supply-Demand Maching Simulator*), propondo como objetivos principais a modelagem, a simulação, a avaliação e o gerenciamento da manufatura, de serviços e de tarefas, estratégias de *design*, estatística e uma melhor visualização da produção.

Entende-se que a infraestrutura inteligente também abrange a manutenção inteligente, considerando que esse modelo de manutenção é mais proativo e age de forma preventiva, e até mesmo preditiva, contra interrupções não planejadas. Os termos manutenção inteligente e manufatura inteligente são amplamente utilizados por agências norte-americanas, como o DoE (Department of Energy) e o NIST (National Institute of Standards Technology) (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

As atividades de manutenção possuem fundamental relevância no cenário das fábricas inteligentes, visto que ao ocorrer uma interrupção não planejada de um equipamento ou de uma máquina, automaticamente ocorrem perdas de eficiência e de produtividade na produção. Nesse novo modelo de manutenção, conhecido como manutenção preventiva ativa, existe uma integração entre a coleta de dados e informações em tempo real, entre os alarmes dos dispositivos, entre os registros históricos e o *statu quo* das máquinas e dos equipamentos. Resumindo, esse novo modelo previne de forma proativa todo o processo contra qualquer tipo de eventualidade (WAN *et al.*, 2017).

Dentro do contexto da gestão da cadeia de suprimentos, os modelos de infraestrutura inteligente são extremamente relevantes, principalmente pelo fato de controlarem a produção, a logística e os processos entre áreas, uma vez que o SCM gera grandes e relevantes impactos dentro de uma organização, atuando em operações de manufatura, coordenação de processos, *marketing*, *design* para novos produtos, finanças e no gerenciamento e planejamento das atividades terceirizadas (MAJEED; RUPASINGHE, 2017). Na Indústria 4.0, o SCM passará por um processo complexo de transformação, impactando também os fornecedores da cadeia e a gestão do ciclo de vida dos produtos (ROBLEK; MESKO; KRAPEZ, 2016). Desse modo, sabendo-se que toda cadeia de suprimentos deve ser monitorada e rastreada em tempo real e que necessita de dados e informações para garantir uma gestão robusta, entende-se que os sistemas CPS, IoT e CM são extremamente relevantes para os processos de transição disruptivos.

2.5.10 Integração vertical, integração horizontal e integração de ponta a ponta

Para os autores Xu e Li (2017), Leyh *et al.* (2017), Wang *et al.* (2016) e Posada *et al.* (2015), a Indústria 4.0 se encontra atrelada às integrações vertical, horizontal e de ponta a ponta (*end to end*), conforme explanado a seguir:

- Integração vertical (*Vertical Integration* – VI): com o pacote de sistemas de produção conectados em rede, com o auxílio do CPS na criação de sistemas de fabricação flexíveis e reconfigurados, possibilitando uma integração entre produção, *supply chain* e *Big-Data*;
- Integração horizontal (*Horizontal Integration* – HI): com a integração de redes geradoras de valor, intensificando o uso da tecnologia para a gestão de dados e informações;
- Integração digital ou de ponta a ponta (*End to End Integration* - EED): com foco na engenharia, no monitoramento das fases do ciclo de vida de um produto, seu *design*, seus processos de fabricação, chegando até o cliente final.

2.5.11 Gerenciamento do ciclo de vida do produto

Segundo Stark (2015), o *Product Lifecycle Management* (PLM) é um sistema que monitora, de forma ágil, o ciclo de vida do produto, desde o seu *design* até seu final de vida, ou seja, sua retirada do mercado. Nesse sentido, é válido explicar que o ciclo de vida de um produto abrange as seguintes etapas: concepção (*design*); desenvolvimento; ordens de fabricação; manufatura; armazenagem; transporte; reciclagem; e demais serviços agregados.

Weyer *et al.* (2015) afirmam que a recente transformação industrial gerará uma grande quantidade de novos produtos com curto ciclo de vida, justificando a exigência de um modelo de produção flexível, ágil e com rápidas reconfigurações, de forma que atenda às demandas do mercado. Dentro do atual modelo de automação industrial, será possível atingir esse nível de flexibilidade e agilidade requerido, considerando-se que a integração desses recursos e processos torna-se necessária para validar o ciclo de vida do produto. Esse sistema complexo apoia os gestores quanto à formação de dados históricos, sendo utilizado até mesmo para a concepção de um novo produto, o que o torna um pré-requisito para a Indústria 4.0 (RAJNAI, KOCSIS, 2018; DE CAROLIS *et al.*, 2017; BANGEMANN *et al.*, 2016).

2.5.12 Perfil do novo profissional 4.0

Considerando que as discussões sobre a Indústria 4.0 tiveram início em 2011, existe uma considerável abrangência de aplicações relacionadas a ela para o futuro, gerando a necessidade de novas e melhores qualificações profissionais em curto espaço de tempo. As empresas inteligentes consideram, de forma contundente, o desenvolvimento e a

disponibilização de plataformas apropriadas para o ensino e treinamento de seus colaboradores, bem como para o desenvolvimento de seus produtos e processos (WEYER *et al.*, 2015). Segundo Roblek, Mesko e Krapez (2016), o novo perfil do profissional que será requisitado e absorvido pela Indústria 4.0 necessitará se desenvolver em um contexto de pensamento digital e deverá possuir apurado senso de análise crítica. Nesse contexto, Vasconcelos (2018) argumenta que o profissional da Indústria 4.0 deve ter uma visão do tipo multiáreas e multidisciplinar.

Na busca pelo desenvolvimento pleno da Indústria 4.0, é necessária a colaboração de diversas e diferentes áreas tecnológicas, como engenharia mecânica, engenharia elétrica, mecatrônica, ciências da computação, entre outras (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017). Nesse sentido, existe uma proposta, elaborada pelo CNE (Conselho Nacional de Educação), de reformulação dos cursos de engenharia no Brasil, de tal forma que eles atendam as necessidades e as novas demandas do mercado de trabalho voltado à Indústria 4.0.

A evolução e o desenvolvimento acelerado dos conceitos da Indústria 4.0 demonstram que a gestão desses novos profissionais, sem dúvida se tornou um grande desafio para os gestores, principalmente pelo fato de que as relações existentes entre fornecedores, empresas, funcionários e clientes crescerão exponencialmente, de forma que esse novo cenário deve se tornar estudo de caso e investigação pelas ciências da administração (LIU, 2017).

Seguindo nessa direção, algumas pesquisas já demonstram haver estudos realizados e voltados para a Sociedade 5.0. Sabe-se que o Japão trabalha em planos robustos e concretos para integrar eficientemente algumas tecnologias, como CPS, à sociedade, administrando problemas reais, como o envelhecimento da sociedade, e adaptando essas tecnologias à busca por melhorias na qualidade de vida da população (COSTA, 2018).

Para se adequar a esse novo perfil de profissional, as organizações devem também se adequar a um novo modo de treinamento dos profissionais. Gorecky, Khamis e Mura (2015) mencionam em seus estudos o sistema VISTRA (*Virtual Simulation and Training*), que foi desenvolvido objetivando o treinamento dos colaboradores num ambiente virtual, porém bastante semelhante às características do cenário real. Esse sistema abre a possibilidade de treinamento do colaborador excluindo todo e qualquer tipo de risco do mundo real, com a utilização de simuladores virtuais e atendendo as necessidades de qualificação para as tendências de novas tecnologias.

Merkel *et al.* (2017) argumentam sobre a aprendizagem nos sistemas de produção ciberfísicos (CPPS – *Cyber-Physical Production Systems*). Esse ambiente de aprendizagem se utiliza das tecnologias mais recentes disponíveis no mercado; os profissionais são treinados

durante o ciclo de aprendizagem sob condições reais, porém de forma segura e isenta de riscos.

Para Galaske *et al.* (2018), os profissionais do setor de produção ou manufatura são os mais afetados pela implementação do cenário da digitalização. Com a introdução da Indústria 4.0, as funções dos operadores de produção sofrerão grandes mudanças, pois eles se tornarão coordenadores de processos. Assim, os atuais operadores de produção passarão a exercer uma função mais estratégica na indústria, principalmente levando-se em conta que o conhecimento e as competências técnicas deixarão de ser um diferencial e passarão a ser parte do atendimento mínimo das exigências relacionadas à Indústria 4.0. Esse cenário afetará também as áreas de serviços e áreas administrativas.

De acordo com estudo realizado pelo Fórum Econômico Mundial, estima-se que os impactos relacionados à implementação da Indústria 4.0 nas indústrias de modo geral chegarão a uma perda de cinco milhões de postos de trabalho até 2020 (GALASKE *et al.*, 2018). Entretanto, existe uma estimativa realizada pelo BCG (Boston Consulting Group) demonstrando um crescimento de 6% no nível de empregos até 2027, pois a demanda no segmento de engenharias crescerá em 10%, existindo também a perspectiva de criação de algo em torno de 1 milhão de postos de trabalho basicamente nas áreas de desenvolvimento de *softwares*, *hardwares* e tecnologia da informação (EXAME, 2018).

Segundo Ortega (2019), apenas em 2019 houve o reconhecimento pela China de mais de 13 novas profissões oficiais relacionadas às áreas de tecnologia, como engenheiro de IA (inteligência artificial), engenheiro de IoT, engenheiro de *Big-Data* e *Big-Data Analysis*, engenheiro de computação na nuvem, gestor digital, técnico em modelagem para arquitetura digital, operador de *e-sports*, jogador de *e-sports*, piloto de *drone*, analista de dados em agricultura, instalador de IoT, operador de robô e manutentor de robôs.

2.6 Modelos de maturidade existentes em domínios relevantes

De acordo com Simpson e Weiner (1989), de modo geral, o termo *maturidade* está relacionado a um “estado de estar perfeito, completo ou de prontidão”, implicando um progresso no desenvolvimento de algum sistema. Consequentemente, os processos de amadurecimento, tais como os que ocorrem nos sistemas biológicos, tecnológicos e organizacionais, tendem a aumentar suas capacidades no decorrer do tempo, considerando-se a conquista futura de algum estado ou situação. Assim, a maturidade pode ser observada tanto

de forma qualitativa como quantitativa e de maneira discreta ou contínua (KOHLEGGGER; MAIER; THALMANN, 2009).

Para O'Donovan, Bruton e O'Sullivan (2016), um modelo de maturidade pode ser definido como uma estrutura conceitual, composta de partes que definem a maturidade ou o *status* de desenvolvimento de uma determinada área de interesse do estudo. Esses autores identificam e descrevem os processos que uma organização deve desenvolver para alcançar um cenário futuro desejado, refletindo aspectos da realidade para classificar as capacidades de determinados domínios de interesse que podem ser usados para análises internas, análises de concorrentes e comparações com as referências no domínio (*benchmark*).

Tais modelos de maturidade normalmente contemplam dimensões e níveis em sua estrutura e baseiam-se nas premissas de que pessoas, organizações, áreas funcionais e processos evoluem por meio de etapas de desenvolvimento em direção a uma maturidade mais avançada, mediante um número determinado de níveis. Dessa forma, determinado nível em um modelo de maturidade pode ser o ponto de partida para a evolução para um nível mais alto de maturidade a ser planejado e implantado.

O objetivo dos modelos de maturidade é quantificar as atividades executadas e torná-las mensuráveis e maduras ao longo do tempo. O conteúdo de cada dimensão pode ser derivado de métodos qualitativos de pesquisa, incluindo revisões bibliográficas, análise de estudos de caso, grupos focais e outras metodologias de geração de ideias e tomada de decisão (O'DONOVAN; BRUTON; O'SULLIVAN, 2016). Os níveis são rótulos ordinais que significam estágios de maturidade, enquanto as dimensões representam recursos específicos de um domínio de interesse. Assim, um nível de maturidade consiste na consolidação de práticas gerais e específicas relacionadas a uma totalidade de processos predefinidos que aumentam o desempenho geral de uma organização ou uma meta específica (SOUZA; GOMES, 2015).

Modelos de maturidade comumente são usados como ferramentas que conceituam e medem a maturidade de uma organização ou de um processo, estando relacionados a algum estado-alvo específico. Embora sejam definidos como sinônimos, os modelos de prontidão, por sua vez, buscam capturar o ponto de partida do processo de desenvolvimento e permitem sua inicialização. Assim, a diferença entre prontidão e maturidade está no sequenciamento, pois a prontidão ocorre antes de se iniciar o processo efetivo de amadurecimento.

A avaliação da maturidade busca capturar o *statu quo* em que a organização se encontra no processo de amadurecimento. No cenário da produção e manufatura, alguns modelos recentes de prontidão e maturidade foram propostos e explorados na gestão de

energia elétrica, em alguns órgãos de serviços públicos, na fabricação e no desenvolvimento de projetos ecológicos e na fabricação enxuta (MGAI; CHAU; POON; TO, 2013; PIGOSSO; ROZENFELD; MCALOONE, 2013; MAASOUMAN; DEMIRLI, 2015).

Em alguns casos, em vez de desenvolver seus próprios modelos de maturidade, as organizações utilizam modelos projetados por instituições especializadas em determinados domínios do conhecimento, como gerenciamento de projetos, *design*, desenvolvimento de *software* ou padronização de sistemas e processos. Os modelos finalizados têm algumas vantagens, como o fato de estarem prontos para ser usados, validados e testados por outras pessoas e instituições, e desvantagens, como o fato de geralmente os escopos atenderem apenas parcialmente as necessidades, sendo generalistas e inflexíveis, no sentido de terem de ser utilizados na forma em que foram construídos (GOKSEN *et al.*, 2015).

2.7 Modelos de maturidade no contexto 4.0

Com base no exposto ao longo deste tópico, verifica-se que o embasamento teórico sobre histórico, desenvolvimento, conceitos, características, componentes e modelos de maturidade existentes acerca da Indústria 4.0 auxiliará a responder as perguntas relacionadas às questões de pesquisa do presente trabalho e também ajudará no cumprimento do objetivo geral.

Inicialmente, realizou-se uma revisão de literatura para que fosse possível entender as características e os componentes da Indústria 4.0. Em seguida, foram pesquisadas informações sobre modelos de maturidades relevantes desenvolvidos na Indústria 4.0, de maneira a compreender as abordagens utilizadas pelos autores e os pontos a serem melhorados.

A transformação para a Indústria 4.0 envolve um aumento significativo de competências digitais na fabricação e causa mudanças em toda a organização. Considerando a alta complexidade dessa transformação, espera-se que demore vários anos para ser planejada e implementada, a fim de possibilitar impactos positivos na lucratividade, por meio de ganhos de eficiência e produtividade, devendo ocorrer em etapas incrementais. Isso pode não ser exatamente sincronizado em todos os processos de negócios, instalações industriais, linhas de produção ou mesmo em todas as células de produção em uma mesma planta. Cada empresa deve decidir qual estágio do desenvolvimento representa um bom equilíbrio entre custos e benefícios da mudança, de acordo com as circunstâncias que envolvem o negócio, com uma

visão de um estado futuro desejado no final do processo de transformação (SCHUH *et al.*, 2017).

Por meio dessas revisões, foram levantadas as características necessárias para desenvolver os níveis de maturidade no cenário da Indústria 4.0. Também identificou-se, no decorrer do tópico, a consolidação dos objetivos específicos deste trabalho aplicado, quais sejam: explorar referenciais teóricos que abordem os conceitos fundamentais da Indústria 4.0; identificar as características relevantes e relacionadas à Indústria 4.0; ampliar a visão predominante da tecnologia sobre os atuais modelos de avaliação, considerando também aspectos organizacionais, econômicos e sociais; identificar e relacionar os modelos atuais de maturidade no contexto da Indústria 4.0; definir e caracterizar um conjunto de dimensões relacionadas à Indústria 4.0 que suportem o modelo proposto; definir, por meio do modelo proposto, o nível de maturidade no contexto da Indústria 4.0 e identificar o grau de homogeneidade existente entre os membros de uma cadeia de suprimentos; e testar o modelo proposto em indústrias de manufatura pertencentes ao segmento de autopeças e localizadas na Grande São Paulo (SP) e em seus fornecedores relevantes.

Finalmente, após o devido entendimento sobre o contexto da Indústria 4.0, será dado início à construção do modelo de maturidade que identificará o grau de homogeneidade entre os membros de uma cadeia de suprimentos, proposto no tópico 1 como objetivo principal deste trabalho. Por meio do quadro 2, a seguir, serão detalhados treze modelos de maturidade desenvolvidos em domínios relevantes.

Quadro 2 – Modelos de maturidade no contexto da indústria 4.0

| MODELOS AVALIADOS NA REVISÃO DA LITERATURA | | | | | DIMENSÕES PROPOSTAS NESTE MODELO | | | | | |
|---|--|--|--|-----------------------------------|--|-------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|------------|
| MODELOS DE MATURIDADE | COMPONENTES RELACIONADOS | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | DIMENSÕES | AUTORES | ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL | FORÇA DE TRABALHO | FÁBRICAS INTELIGENTES | PROCESSOS INTELIGENTES | PRODUTOS E SERVIÇOS INTELIGENTES | TECNOLOGIA |
| WM4.0 (<i>Tollbox Workforce Management</i> 4.0) | Novo perfil profissional | Os elementos deste modelo são divididos em quatro níveis: habilidades difíceis; habilidades suaves; usabilidade e operabilidade; e ambiente de trabalho. | Não divulgadas. | Galaske <i>et al.</i> (2018) | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| DREAMY (<i>Digital Readiness Assessment Maturity Model</i> 4.0) | CPS; MA; AM; AR; VR; IoT; Impactos IoT; CM; VI; HI; EEI; PLM | Baseado no modelo CMMI (<i>Capability Maturity Model Integration</i>), foca em cinco áreas específicas, considerando atividades geradoras de valor: Design e Engenharia; Gestão da Produção; Gestão da Qualidade; Gestão da Manutenção; e Gestão da Logística. | 1. Processo; 2. Monitoramento e controle; 3.Tecnologia; 4. Organização | De Carolis <i>et al.</i> , (2017) | X | | | X | | X |

| MODELOS AVALIADOS NA REVISÃO DA LITERATURA | | | | | DIMENSÕES PROPOSTAS NESTE MODELO | | | | | |
|--|--|---|---|----------------------|--|---------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|------------|
| MODELOS DE MATURIDADE | COMPONENTES RELACIONADOS | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | DIMENSÕES | AUTORES | ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL | FORMAÇÃO DE TRABALHADORES | FÁBRICAS INTELIGENTES | PROCESSOS INTELIGENTES | PRODUTOS E SERVIÇOS INTELIGENTES | TECNOLOGIA |
| Maturity Index Industry 4.0 | CPS; MA; AM; AR; VR; IoT; Impactos IoT; CM; VI; HI; EEI; PLM; novo perfil profissional | Desenvolvido pela Academia Alemã de Ciência e Engenharia (ACATECH – The National Academy of Science and Engineering), foca no desenvolvimento da estrutura e da | 1. Recursos; 2. Sistemas de Informação; 3. Estrutura organizacional; 4. Cultura organizacional | Schuh et al. (2017) | X | | | | | |
| MM (Maturity Model Industry 4.0) | CPS; IoT; Impactos IoT | Baseia-se nas dimensões do SPICE (Software Process Improvement and Capability Determination) | 1. Gerenciamento de ativos; 2. Governança de dados; 3. Gerenciamento de aplicativos; 4. Transformação de processos; 5. Alinhamento organizacional | Gokalp et al. (2017) | X | | | X | | |

| MODELOS AVALIADOS NA REVISÃO DA LITERATURA | | | | | DIMENSÕES PROPOSTAS NESTE MODELO | | | | | |
|--|--------------------------|---|-----------------|----------------------------|--|-------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|------------|
| MODELOS DE MATURIDADE | COMPONENTES RELACIONADOS | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | DIMENSÕES | AUTORES | ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL | FORÇA DE TRABALHO | FÁBRICAS INTELIGENTES | PROCESSOS INTELIGENTES | PRODUTOS E SERVIÇOS INTELIGENTES | TECNOLOGIA |
| M2DDM (<i>Maturity Model for Data-Driven Manufacturing</i>) | CPS; IoT; Impactos IoT. | Abrange seis níveis: integração de TI inexistente; integração de dados e sistemas; integração de dados entre ciclos de vida; orientação para serviço; <i>digital twin</i> ; fábrica auto-otimizadora. | Não divulgadas. | Weber <i>et al.</i> (2017) | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| <i>The IoT Technological Maturity Model</i> | CPS; IoT; Impactos IoT | Composto por oito níveis de maturidade: maturidade 3.0; maturidade inicial nível 4.0; conectado; aprimorado; inovação; integrado; extensivo; e maturidade 4.0. | Não divulgadas. | Jaeger e Halse (2017) | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

| MODELOS AVALIADOS NA REVISÃO DA LITERATURA | | | | | DIMENSÕES PROPOSTAS NESTE MODELO | | | | | |
|--|--|--|---|--------------------------------|--|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--|------------------|
| MODELOS DE MATURIDADE | COMPONENTES RELACIONADOS | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | DIMENSÕES | AUTORES | ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL | FORÇA DE TRABALHO | FÁBRICAS INTEGEN- TES | PRO- CESSOS INTE- LI- GEN- TES | PRO- DUTOS E SER- VI- ÇOS INTE- LI- GEN- TES | TEC- NO- LO- GIA |
| SMMI4.0 (<i>System Integration Maturity Model Industry 4.0</i>) | CPS; IoT; Impactos IoT | Modelo em que a empresa identifica seu nível tecnológico (recursos de TI). | 1.Integração vertical; 2.Integração horizontal; 3.Desenvolvimento de produtos digitais; 4. Critérios de tecnologia transversal | Leyh <i>et al.</i> (2016) | | | | | X | X |
| <i>Industry 4.0 Maturity Model</i> | CPS; MA; AM; AR; VR; IoT; Impactos IoT; CM; VI; HI; EEI; PLM; novo perfil profissional | Avalia a maturidade de uma organização de forma ampla. | 1. Liderança; 2. Estratégia; 3. Cultura; 4. Pessoas; 5. Tecnologia; 6. Operações; 7. Produtos; 8. Clientes; 9. Governança | Schumacher, Erol e Sihn (2016) | X | X | | | X | X |

| MODELOS AVALIADOS NA REVISÃO DA LITERATURA | | | | | DIMENSÕES PROPOSTAS NESTE MODELO | | | | | |
|--|--|--|--|------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|------------|
| MODELOS DE MATURIDADE | COMPONENTES RELACIONADOS | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | DIMENSÕES | AUTORES | ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL | FORMAÇÃO DE TRABALHOS | FÁBRICAS INTELIGENTES | PROCESSOS INTELIGENTES | PRODUTOS E SERVIÇOS INTELIGENTES | TECNOLOGIA |
| <i>Digital Maturity Model 4.0</i> | CPS; MA; AM; AR; VR; IoT; Impactos IoT; CM; VI; HI; EEI; PLM | Busca auxiliar as empresas a se desenvolverem no cenário da digitalização. | 1. Cultura 2. Organização 3. Tecnologia 4. <i>Insight</i> | Gill e Van-Boskirk (2016) | X | | | | | X |
| MVMM (<i>Manufacturing Value Modeling Methodology</i>) | CPS; MA; AM; AR; VR; IoT; Impactos IoT; CM; VI; HI; EEI; PLM; novo perfil profissional | Desenvolvido em parceria com a empresa Siemens. Baseia-se em cinco etapas distintas: mapa de valor; modelo de maturidade; análise de lacunas; processos; validação; e definição das áreas de melhoria. | Não divulgadas. | Tonelli <i>et al.</i> (2016) | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

| MODELOS AVALIADOS NA REVISÃO DA LITERATURA | | | | | DIMENSÕES PROPOSTAS NESTE MODELO | | | | | |
|---|--|--|--|--------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|------------|
| MODELOS DE MATURIDADE | COMPONENTES RELACIONADOS | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | DIMENSÕES | AUTORES | ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL | FORMAÇÃO DE TRABALHOS | FÁBRICAS INTELIGENTES | PROCESSOS INTELIGENTES | PRODUTOS E SERVIÇOS INTELIGENTES | TECNOLOGIA |
| IMPULS (<i>Industry 4.0 – Readiness</i>) | CPS; MA; AM; AR; VR; IoT; Impactos IoT; CM; VI; HI; EEI; PLM; novo perfil profissional | Avalia a maturidade de uma organização por meio de aspectos comportamentais e da gestão técnica. | 1. Estratégia e organização; 2. Funcionários; 3. Fábricas inteligentes; 4. Operações inteligentes; 5. Produtos inteligentes; 6. Serviços orientados para dados | Lichtblau <i>et al.</i> (2015) | X | X | X | X | X | |
| IT – <i>Architecture, Capabilities, IoT in SCM Domain</i> | CPS; IoT; Impactos IoT | Concentra-se em como o conceito de IoT é adotado no domínio da cadeia de suprimentos. | Não divulgadas. | Katsma <i>et al.</i> (2011) | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

| MODELOS AVALIADOS NA REVISÃO DA LITERATURA | | | | | DIMENSÕES PROPOSTAS NESTE MODELO | | | | | |
|--|--|--|--|----------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|------------|
| MODELOS DE MATURIDADE | COMPONENTES RELACIONADOS | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | DIMENSÕES | AUTORES | ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL | FORMAÇÃO DE TRABALHOS | FÁBRICAS INTELIGENTES | PROCESSOS INTELIGENTES | PRODUTOS E SERVIÇOS INTELIGENTES | TECNOLOGIA |
| <i>Architecture and Maturity Levels for CPS – Cyber-Physical Systems</i> | CPS; IoT; Impactos IoT | Avalia a maturidade de uma organização. | Não divulgadas. | Wester mann <i>et al.</i> (2016) | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Modelo MMI4 (<i>Maturity Model for Industry 4.0</i>) | CPS; MA; AM; AR; VR; IoT; Impactos IoT; CM; VI; HI; EEI; PLM; novo perfil profissional | Focado nas características e nos componentes encontrados na revisão da literatura e na avaliação dos modelos existentes e relevantes. Utiliza-se de questionário e avalia os dados obtidos por meio da utilização da lógica <i>fuzzy</i> . | 1. Tecnologia; 2. Processo; 3. Produção; 4. Estratégia da organização | Bassetto (2019) | X | | X | X | | X |

| MODELOS AVALIADOS NA REVISÃO DA LITERATURA | | | | | DIMENSÕES PROPOSTAS NESTE MODELO | | | | | |
|--|--|--|---|--------------------------|--|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|------------|
| MODELOS DE MATURIDADE | COMPONENTES RELACIONADOS | CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS | DIMENSÕES | AUTORES | ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL | FORMAÇÃO DE TRABALHOS | FÁBRICAS INTELIGENTES | PROCESSOS INTELIGENTES | PRODUTOS E SERVIÇOS INTELIGENTES | TECNOLOGIA |
| <i>Proposta de Modelo de Maturidade da Indústria 4.0 (An Industry 4.0 Maturity Model Proposal)</i> | CPS; MA; AM; AR; VR; IoT; Impactos IoT; CM; VI; HI; EEI; PLM; novo perfil profissional | Focado nas características e nos componentes encontrados na revisão da literatura e na avaliação dos modelos existentes e relevantes. Este modelo é útil para fazer um diagnóstico inicial e estabelecer um roteiro para prosseguir com a implementação. | 1. Estratégia, estrutura e cultura organizacional; 2. Força de trabalho; 3. Fábricas inteligentes; 4. Processos inteligentes; 5. Produtos e serviços inteligentes | Santos e Martinho (2019) | X | X | X | X | X | |

Fonte: Elaboração própria (2020)

2.7.1 Modelo WM4.0 (*Toolbox Workforce Management 4.0*)

Desenvolvido com base em outros dois modelos, *Guideline Industrie 4.0* e *Generic Procedure Model for Industrie 4.0* (GALASKE *et al.*, 2018), esse modelo integra os fatores humanos ao contexto da Indústria 4.0 e analisa o cenário da indústria relacionado às competências e às condições de trabalho para o desenvolvimento da fabricação digital na Indústria 4.0.

Os elementos desse modelo são divididos em quatro níveis: habilidades difíceis (*hard skills*); habilidades suaves (*soft skills*); usabilidade e operabilidade (*usability & operability*) e ambiente de trabalho (*work environment*).

2.7.2 Modelo DREAMY (*Digital Readiness Assessment Maturity Model*)

Desenvolvido por De Carolis *et al.* (2017), foca na identificação do nível de maturidade em que a empresa se encontra no cenário da Indústria 4.0. Foi baseado no modelo CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), que é internacionalmente reconhecido, consolidado na literatura e uma referência amplamente utilizada para a avaliação do nível de maturidade das indústrias dos mais diversos segmentos de mercado (MAGNO *et al.*, 2011), identificando seus pontos fortes e fracos relacionados à utilização de tecnologia.

O modelo DREAMY foca em cinco áreas específicas, considerando atividades geradoras de valor na indústria, com macroprocessos-chave constituindo cada uma das áreas em questão: *design* e engenharia; gestão da produção; gestão da qualidade; gestão da manutenção e gestão da logística. Esse modelo também avalia o desempenho digital da indústria, definindo para isso quatro dimensões, quais sejam: processo; monitoramento e controle; tecnologia e organização.

O modelo em questão tem foco na utilização de tecnologias voltadas para o SCM e é apresentado por meio de um questionário estruturado que considera as áreas de processo, observando a capacidade da empresa de acordo com as dimensões.

Duarte (2017) e Groffe (2013) afirmam que o modelo CMMI teve seu desenvolvimento realizado pelo SEI (*Software Engineering Institute*), um órgão atrelado à *Carnegie Mellon University*, nos Estados Unidos. Essa instituição propôs os seis estágios de maturidade que demonstram o processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento das indústrias relacionadas à Indústria 4.0, detalhando também o nível de evolução dentro desse contexto e

os objetivos preestabelecidos, assegurando, assim, que cada etapa propicie o atingimento do próximo estágio. A seguir, são apresentados os seis estágios de maturidade.

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

Dessa forma, quando a indústria atingir cada estágio de maturidade, estará também evoluindo em seus processos e em seu nível de maturidade, no que se refere aos componentes da Indústria 4.0.

Os seis 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.

2.7.3 Modelo *Industrie Maturity Index*

Proposto por Schuh *et al.* (2017) e desenvolvido pela Academia Alemã de Ciência e Engenharia (ACATECH – The National Academy of Science and Engineering), esse modelo busca transformar a organização em um modelo ágil de aprendizagem, assegurando a tomada de decisão rápida e a adaptação dos negócios de forma ampla. O modelo *Industrie Maturity Index* foca no desenvolvimento da estrutura e da cultura organizacional por meio de estágios. Considerando e propondo a análise de dimensões nesta pesquisa e relacionando-as a questões

comportamentais, os requisitos necessários para uma gestão ágil e responsiva às mudanças de contexto e cenário desejadas são expostos da seguinte forma:

- Estrutura organizacional – ênfase na organização das tarefas, autonomia dos funcionários/colaboradores, motivação, definição de metas, flexibilidade e diversidade de habilidades da equipe, colaboração por meio da cadeia de valor e orientação ao cliente;
- Cultura organizacional – valoriza as características comportamentais desejadas pelos funcionários, como liderança, comunicação aberta entre as equipes e adaptação às mudanças tecnológicas;
- Recursos – esta dimensão compreende recursos para digitalização de processos, aquisição automatizada de dados, comunicação estruturada, descentralização e automação de processos e contextualização de acessórios tecnológicos para tarefas específicas;
- Sistemas de informação – esta dimensão enfoca a importância central dos sistemas de informação e operação no contexto da Indústria 4.0, permitindo sua integração vertical na empresa, sua integração horizontal por meio da cadeia de valor e a padronização de interfaces de comunicação, com a entrega de informações contextualizadas para cada equipe ou indivíduo.

Um questionário foi desenvolvido com respostas de múltipla escolha buscando identificar o nível de maturidade em que a empresa está atrelada aos seis estágios de desenvolvimento (RAJNAI; KOCSIS, 2018).

2.7.4 Modelo MM (*Maturity Model Industry 4.0*)

Proposto por Gokalp, Şener e Eren (2017), baseia-se nas dimensões do SPICE (*Software Process Improvement and Capability Determination*), com cinco dimensões definidas: gerenciamento de ativos; governança de dados; gerenciamento de aplicativos; transformação de processos e alinhamento organizacional. Ademais, esse modelo estabelece seis níveis distintos de avaliação, quais sejam: incompleto; realizado; gerenciado; estabelecido; previsível e otimizado.

2.7.5 Modelo M2DDM (*Maturity Model for Data-Driven Manufacturing*)

Proposto por Weber *et al.* (2017), abrange seis níveis apresentados da seguinte forma: integração de TI inexistente; integração de dados e sistemas; integração de dados entre ciclos de vida; orientação para serviço; *digital twin* e fábrica auto-otimizada.

2.7.6 *The IoT Technological Maturity Model*

Proposto por Jaeger e Halse (2017) e composto por oito níveis de maturidade:

- Maturidade 3.0 atingimento da Terceira Revolução Industrial pela organização;
- Maturidade inicial nível 4.0 – possuir ao menos um objeto habilitado para a Indústria 4.0;
- Conectado – possuir de dois a nove dispositivos relacionados a Indústria 4.0;
- Aprimorado – ativos se comunicando horizontalmente;
- Inovação – controle da cadeia de suprimentos como principal característica;
- Integrado – opera serviços da IoT habilitados na Indústria 4.0;
- Extensivo – engloba a rede externa no ambiente fabril, alterando a gestão do *Big-Data*;
- Maturidade 4.0 – contempla a maturidade da Quarta Revolução Industrial (IoT, CPS).

2.7.7 Modelo SMMI 4.0 (*System Integration Maturity Model Industry 4.0*)

Este modelo foi abordado em dois artigos, ambos elaborados por Leyh *et al.* (2016). O primeiro artigo propõe um modelo em que a empresa identifica seu nível tecnológico (recursos de TI – tecnologia da informação) quanto aos requisitos da Indústria 4.0. Nele, os autores identificaram quatro dimensões que avaliam o nível de maturidade, quais sejam: integração vertical; integração horizontal; desenvolvimento de produtos digitais (produtos inteligentes) e critérios de tecnologia transversal (tecnologias utilizadas na Indústria 4.0).

O modelo SMMI 4.0 propõe, ainda, cinco estágios capazes de identificar o *statu quo* da organização: nível básico da digitalização; digitalização entre setores; digitalização horizontal e vertical; digitalização completa e digitalização completa e otimizada.

No segundo artigo, visando a sequência do trabalho, os autores desenvolveram e aplicaram um questionário relacionado ao modelo. Esse artigo também demonstra equações para o cálculo dos níveis de maturidade baseando-se nas respostas do questionário.

2.7.8 Modelo *Industry 4.0 Maturity*

Modelo empírico e proposto por Schumacher, Erol e Sihm (2016), avalia a maturidade de uma organização no contexto da Indústria 4.0, e é focado nas tecnologias desenvolvidas nos aspectos organizacionais. Este modelo apresenta nove dimensões, representadas da seguinte forma:

- Liderança – espera-se uma coordenação centralizada e focada nas premissas da Indústria 4.0;
- Estratégia – abrange questões como a compatibilização da Indústria 4.0 com a estratégia corporativa, o gerenciamento de recursos para a execução das ações e a adaptação do modelo de negócios aos requisitos da Indústria 4.0;
- Cultura – enfatiza a abertura à inovação, a colaboração entre empresas e a valorização das ICTs;
- Pessoas – aborda as competências e a abertura dos funcionários para as novas tecnologias e sua autonomia para tomar decisões;
- Tecnologia – ligada à utilização de tecnologias aplicadas para aumentar a eficiência da comunicação e das operações, incluindo a comunicação máquina a máquina;
- Operações – contempla a descentralização, a digitalização de processos e a colaboração interdisciplinar e interdepartamental;
- Produtos – aborda a integração de produtos a outros recursos e sistemas por meio de sua digitalização, tratando da flexibilidade de reconfiguração dos produtos e visando sua individualização;
- Clientes e governança – dimensões relacionadas a questões contextuais externas às empresas/organizações, incluindo aspectos relacionados a leis trabalhistas, de propriedade intelectual, padronização de tecnologias, definição de padrões emergentes de tecnologia, gerenciamento, análise digital e utilização de dados relacionados a vendas aos clientes (*Big-Data* e *Big-Data Analysis*).

Este modelo também se baseia nas principais questões e tecnologias facilitadoras da Indústria 4.0. Nele, considera-se que a implantação dessas tecnologias no ambiente de fabricação pode promover vantagens competitivas e novas oportunidades de negócios, gerando grandes mudanças em toda a cadeia de valor. O modelo identifica, ainda, que um dos principais atributos da Quarta Revolução Industrial será a integração, que é facilitada pelas tecnologias emergentes e inovadoras, com especial atenção às ICTs.

Este modelo foi parcialmente publicado em um artigo de periódico, mas a revisão da literatura não revelou nenhum material demonstrando sua implementação efetiva. Assim, devido à falta de informações relevantes quanto à sua implantação, a utilização deste modelo fica comprometida. Outrossim, a revisão da literatura mostra a importância dos problemas de segurança de informações e o surgimento dos *layouts* reconfiguráveis.

O modelo Industry 4.0 Maturity foca na comunicação máquina a máquina e nos processos autônomos, recursos importantes e cruciais na Indústria 4.0. Em termos de gestão estratégica, apenas este modelo se refere à disponibilidade de recursos necessários e ao apoio e suporte necessários vindos da alta gerência e da coordenação central da organização.

2.7.9 Modelo *Digital Maturity 4.0*

Este modelo foi desenvolvido por Gill e VanBoskirk (2016) e contempla o resultado de vários anos de pesquisa. Busca, como objetivo principal, auxiliar as empresas a se desenvolver e a atingir níveis mais elevados de maturidade no cenário da digitalização. Propõe o foco em quatro dimensões: cultura; organização; tecnologia; e *insight*.

É possível avaliar cada dimensão por meio de quatro afirmações para cada uma delas, com a possibilidade das seguintes respostas: discordo completamente; discordo um pouco; concordo de alguma forma; e concordo completamente. Os níveis são descritos da seguinte forma: nível 1 – céticos; nível 2 – adotantes; nível 3 – colaboradores; e nível 4 – diferenciados. Ademais, de acordo com os autores Rajnai e Kocsis (2018), os critérios apresentados neste modelo podem exibir variações de acordo com o segmento em que a organização está inserida.

2.7.10 Modelo MVMM (*Manufacturing Value Modeling Methodology*)

O modelo MVMM foi desenvolvido por Tonelli *et al.* (2016) em parceria com a empresa Siemens. Este modelo se baseia em cinco etapas distintas: mapa de valor; modelo de

maturidade (*statu quo* da organização); análise de lacunas e processos; validação e definição das áreas de melhoria.

2.7.11 Modelo IMPULS (*Industry 4.0 – Readiness*)

Este modelo foi proposto por Lichtblau *et al.* (2015), tendo como ponto de partida seis dimensões, sendo duas delas ligadas a questões comportamentais e de gestão e as outras quatro relacionadas a questões técnicas. As dimensões ligadas a questões comportamentais e de gestão são:

- Estratégia e organização – essa dimensão avalia questões ligadas à estratégia, à responsabilidade da alta administração na condução de ações transformacionais e à gestão estratégica, que deve ser focada na Indústria 4.0, na alocação de recursos/investimentos e na abertura à inovação e à gestão da inovação;
- Força de trabalho – essa dimensão avalia as habilidades dos funcionários/colaboradores, dividindo-as em dois subcomponentes: as habilidades existentes e a necessidade de aquisição de novas habilidades, por meio da qualificação dos funcionários.

As dimensões relacionadas a questões técnicas, por sua vez, compreendem os principais aspectos de uma composição de estruturas e os recursos inteligentes para a visão futura. São elas:

- Fábrica inteligente;
- Operações inteligentes;
- Produtos inteligentes;
- Serviços orientados para dados.

As dimensões deste modelo são agrupadas por indicadores, com os níveis estabelecidos da seguinte forma: leigo; iniciante; intermediário; experiente; *expert*; e alta *performance*.

Este modelo se baseia nas principais questões de tecnologias facilitadoras da Indústria 4.0, e considera que a implantação dessas tecnologias no ambiente fabril pode proporcionar e alavancar vantagens competitivas e novas oportunidades de negócios, gerando grandes mudanças em toda a cadeia de valor e possibilitando, também, a identificação da integração

de dados, que é um dos principais atributos da Quarta Revolução Industrial, facilitada pelas tecnologias emergentes e inovadoras, com especial atenção às ICT.

2.7.12 Modelo *IT Architecture, Capabilities, IoT in SCM Domain*

Este modelo foi proposto por Katsma *et al.* (2011) e se concentra em como o conceito de IoT é adotado no domínio da cadeia de suprimentos, pois a IoT não é apenas uma nova tecnologia, ela requer uma mentalidade completamente diferente e uma orquestração de processos entre parceiros nas redes de suprimentos. Os conceitos anteriores no SCM foram construídos, em grande parte, com a premissa de que o planejamento colaborativo e a troca de informações com os parceiros são posicionados como o instrumento para lidar com a incerteza e melhorar a cadeia de suprimentos geral (LEE, 1997; LAMBERT e COOPER, 2000) e sua robustez (CHEN, 1999). Nesse sentido, segundo Giunipero *et al.* (2008), as organizações tendem a se concentrar mais nas operações de uma empresa do que na função mais ampla da cadeia de suprimentos.

O modelo em questão busca, como principal objetivo, apresentar uma estrutura arquitetônica para investigar quatro camadas de implantação. Essa estrutura permite que profissionais e cientistas especifiquem um *statu quo* em diferentes níveis de abstração e também que identifiquem possibilidades de melhorias adicionais.

2.7.13 Modelo *Architecture and Maturity Levels for CPS*

Este modelo foi proposto por Westermann *et al.* (2016) e foca nos CPS, considerando-os como sistemas embarcados e conectados que registram diretamente dados físicos usando sensores inteligentes que afetam processos físicos por meio de atuadores. Esses sistemas avaliam e salvam dados gravados, utilizando serviços disponíveis globalmente, e interagem com os operadores por meio de interfaces ser humano-máquina multimodais.

No contexto da produção industrial, o CPS altera radicalmente os processos de produção, pois enfrenta os desafios de uma complexidade crescente e de uma quantidade quase incontável de novas soluções baseadas na tecnologia da informação e comunicação, que contribui com uma arquitetura de referência e níveis de maturidade para o CPS. A arquitetura de referência serve como um plano universal para estruturar o CPS e visualizar todos os componentes e seus relacionamentos, com a definição de níveis de maturidade que

ajudam as empresas a avaliar o *statu quo*, a determinar o estado-alvo e a definir ações concretas para melhorar seus sistemas.

2.7.14 Modelo MMI4 (*Maturity Model for Industry 4.0*)

O modelo MMI4 (*Maturity Model for Industry 4.0*) foi desenvolvido por Basseto (2019) e foca em auxiliar as indústrias em seu processo de transformação. Está relacionado aos conceitos da Indústria 4.0, possibilitando a identificação, pela empresa, do nível de maturidade em que ela se encontra no contexto do cenário 4.0.

O modelo em questão baseia-se no CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), que é um modelo consolidado pela literatura, utilizado para avaliar a maturidade. O CMMI permite avaliar tanto os pontos fortes e fracos das empresas em relação à tecnologia quanto o conjunto de oportunidades oferecidas às empresas relacionadas à transformação digital.

Para o desenvolvimento do modelo MMI4, Basseto (2019) levantou as características e os componentes relevantes no contexto da Indústria 4.0. Além disso, esse autor realizou uma extensa revisão da literatura, com o objetivo de identificar e analisar os modelos de maturidade existentes em domínio relevantes, e definiu cinco dimensões para avaliar o desempenho digital das empresas: *tecnologia, processo, produção e estratégia da organização*. Ademais, foi desenvolvido um questionário estruturado, com possibilidades de respostas de múltipla escolha, para identificar o nível de maturidade em que a empresa se encontra, atrelado as cinco dimensões apresentadas neste modelo.

2.7.15 Proposta de Modelo de Maturidade da Indústria 4.0 (*An Industry 4.0 Maturity Model Proposal*)

Santos e Martinho (2019) propuseram este modelo com o objetivo de desenvolver uma ferramenta para avaliar o nível de maturidade na implementação de conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 em empresas de manufatura.

Usando uma estrutura para desenvolver modelos de maturidade encontrados na literatura, foram tomadas quatro etapas principais nesse desenvolvimento: o *design* do modelo; a análise comparativa entre modelos existentes; entrevistas com membros de indústrias relevantes; e testes-piloto.

Este modelo de maturidade apresenta, ainda, um questionário estruturado, com possibilidade de respostas de múltipla escolha, considerando seis dimensões definidas:

estratégia organizacional; estrutura e cultura organizacional; força de trabalho; fábricas inteligentes; processos inteligentes; e produtos e serviços inteligentes.

2.8 Análise dos modelos de maturidade da Indústria 4.0 existentes em domínios relevantes

Os modelos descritos avaliam o nível de maturidade das organizações em diferentes áreas, chamadas dimensões. Cada dimensão é descrita por vários recursos de transformação. A maturidade do setor 4.0 é definida avaliando-se o grau de implementação de cada capacidade de transformação e, consequentemente, de cada dimensão.

Todos os modelos analisados neste trabalho aplicado são baseados nos principais conceitos e nas principais tecnologias facilitadoras da Indústria 4.0. Tais modelos consideram que essas tecnologias aplicadas ao ambiente industrial são capazes de gerar mudanças significativas na competitividade das empresas e na abertura de novas oportunidades de negócios. De modo geral, os modelos analisados abrangem as principais áreas estruturais das empresas, considerando produtos, instalações, processos operacionais, processos de gestão, força de trabalho, cultura e estrutura organizacional e recursos tecnológicos, tudo devidamente observado na revisão de literatura.

A partir da comparação dos modelos analisados e das oportunidades de melhoria neles, foi possível identificar uma divisão relacionada ao foco de cada publicação. Nesse cerne, o primeiro grupo de autores (Gokalp, Şener e Eren, 2017; Weber *et al.*, 2017; Jaeger e Halse, 2017; Leyh *et al.*, 2016; e Katsma *et al.*, 2011) concentra-se nos recursos e nas arquiteturas de sistemas, principalmente as relacionadas à Internet das Coisas. Ainda nesse grupo, há Westermann *et al.* (2016), que se concentram no componente relacionado a sistemas ciberfísicos.

O segundo grupo de autores (De Carolis *et al.*, 2017; Schuh *et al.*, 2017; Gill e VanBoskirk, 2016; Tonelli *et al.*, 2016; e Lichtblau *et al.*, 2015) concentra-se em questões comportamentais, na gestão, nas estruturas e nas culturas organizacionais, seguindo uma perspectiva mais ampla e alinhando seus modelos aos fenômenos da Indústria 4.0, porém reconhecendo que a digitalização afeta de forma radical e de maneira única e sem precedentes, a gestão dos negócios atualmente praticada pelas organizações, principalmente no segmento de empresas de manufatura.

Quanto ao terceiro grupo, existe uma abordagem única relacionada a fatores humanos, competências e condições de trabalho por parte de Galaske *et al.* (2018). Por fim, há o quarto

grupo de autores, com o modelo de Schumacher, Erol e Sihn (2016), que contempla uma perspectiva de abordagem mais ampla e completa, considerando em seu modelo nove dimensões. Porém, segundo Gokalp, Şener e Eren (2017), o modelo de Schumacher, Erol e Sihn não representa a plenitude da maturidade na Indústria 4.0, pois não apresenta informações claras sobre a estrutura do modelo, como o questionário, não havendo também informações mais detalhadas sobre as dimensões, fato que poder gerar oportunidade de melhorias no modelo.

A documentação dos modelos anteriormente descritos e analisados é basicamente insatisfatória, o que é um problema recorrente nos modelos de maturidade (ALBLIWI; ANTONY; ARSHED, 2014). Abre-se, dessa forma, uma discussão sobre o fato de que nenhum dos modelos pode ser totalmente aplicado utilizando apenas as informações publicadas, pois alguns deles nem sequer fornecem uma descrição completa dos estágios de maturidade, como o modelo de Schumacher, Erol e Sihn (2016). Outros modelos fornecem pelo menos informações parciais e descrevem brevemente as características de cada estágio e a dimensão da maturidade (WESTERMANN *et al.*, 2016; KLOTZER; PFLAUM, 2017).

De modo geral, a revisão da literatura mostra haver uma falta de modelos de maturidade avançados do setor 4.0 e com uma documentação abrangente e disponível. Assim, faz parte do objetivo geral deste trabalho aplicado complementar as publicações anteriormente descritas, de forma oportuna, desenvolvendo um modelo novo e aprimorado, que una os atributos positivos de cada um dos modelos apresentados, permitindo aos tomadores de decisão documentar o *statu quo* de suas organizações e desenvolver uma visão holística em seus negócios, fornecendo a devida orientação para a obtenção da excelência em seus processos e abrindo a possibilidade de comparação das capacidades entre unidades de negócios e outras organizações como um processo importante de agregação de valor (RUTNER; LANGLEY, 2000).

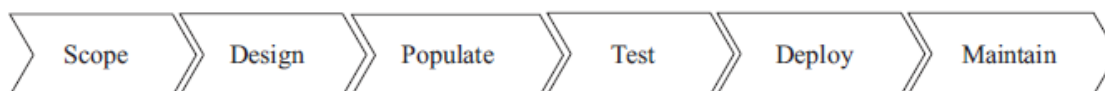
Além disso, o novo modelo proposto será relacionado à gestão da cadeia de suprimentos, preenchendo as lacunas existentes, e deve seguir o princípio de que os modelos de maturidade, incluindo os da Indústria 4.0, sugerem um processo natural de melhoria contínua ao longo do tempo para refletir as atualizações de conceitos e tecnologias para o conteúdo a ser avaliado.

2.9 Metodologia de desenvolvimento do modelo proposto

O atual desenvolvimento da Indústria 4.0 é um problema de campo pertinente que requer novos recursos para permanecer competitivo, portanto, consideramos que a pesquisa na ciência do *design* (DSR – *Design Science Research*) representa uma base apropriada, pois se concentra no desenvolvimento e aplicação de ferramentas. De modo geral, estas ferramentas podem ser qualquer tipo de construção, modelo ou método (Hevner *et al.*, 2004). No nosso trabalho a ferramenta utilizada é o modelo de maturidade da Indústria 4.0 para identificar o grau de homogeneidade dos membros de uma cadeia de suprimentos. De acordo com Osterle *et al.*, (2010), um projeto típico de pesquisa na ciência do *design* (DSR), consiste em quatro fases: análise, *design*, avaliação e difusão. Nosso trabalho está focado nas etapas de *design* e avaliação, descrevendo o desenvolvimento e a avaliação do modelo. Hevner *et al.* (2004) apresentaram as diretrizes para o DSR e destacam a importância da aplicação de métodos rigorosos na construção e avaliação destas ferramentas.

De Bruin *et al.* (2005) propõem em sua metodologia uma sequência de seis etapas interativas, pois os resultados de uma determinada etapa podem exigir que uma etapa anterior seja revisitada para aprimoramento. A figura 3 sintetiza as etapas do processo de desenvolvimento que são sucintamente descritas, a seguir, para uma melhor compreensão da metodologia.

Figura 3 – Descrição das etapas do processo de desenvolvimento de um modelo de maturidade



Fonte: Adaptado de De Bruin *et al.* (2005)

I – Escopo

A primeira etapa define o escopo do modelo, que pode ser geral ou específico, do domínio. Modelos gerais podem ser aplicados a diferentes domínios (por exemplo, gerenciamento de qualidade ou da cadeia de suprimentos), enquanto modelos específicos de domínio são acoplados a um determinado campo de aplicação (por exemplo, desenvolvimento de *software*). Além disso, as partes interessadas que podem ajudar no desenvolvimento do modelo ou se beneficiar de sua aplicação devem ser identificadas. Essas partes podem ser da academia, da indústria, do governo ou uma combinação entre eles.

II – Design

A segunda etapa determina a arquitetura do modelo com base em cinco subcritérios: audiência; método de aplicação; *driver* de aplicação; respondentes; e aplicação do modelo. A definição do público-alvo para atender suas necessidades é importante e especialmente relevante para o nível de detalhe, pois se observa uma interação entre a precisão e a simplicidade.

Sobre os elementos estruturais de um modelo de maturidade, De Bruin *et al.* (2005) observam que existe a possibilidade de variação do número de estágio, de modelo para modelo, porém, é imprescindível que os estágios finais sempre sejam distintos e bem definidos, garantindo que haja uma progressão lógica através dos estágios.

Esses autores também ressaltam haver a necessidade do fornecimento de um resumo contendo os principais requisitos e as medidas de cada etapa do processo, principalmente no que diz respeito aos aspectos novos para determinada etapa, que não tenham sido incluídos como elementos das etapas anteriores, sendo esses estágios devidamente aplicados às dimensões do modelo. A inclusão de várias dimensões permite a modelagem de domínios complexos. Cada dimensão certamente representa diferentes estágios de maturidade, podendo facilitar as análises de forma mais detalhada e identificar oportunidades específicas para melhorias.

III – Preenchimento

A terceira etapa aborda o quesito do conteúdo específico do modelo com a definição de seus componentes e subcomponentes. Nesse sentido, cabe ressaltar que um componente indica o que precisa ser medido.

De acordo com De Bruin *et al.* (2005), os componentes podem ser definidos por uma revisão da literatura ou pelo uso de abordagens empíricas, como entrevistas com as partes interessadas, a aplicação de ferramentas de pesquisas, grupos focais e estudos de caso.

IV – Teste

A quarta etapa testa a validade e a confiabilidade do modelo, fortalecendo a relevância e o rigor definidos. O processo de validação do modelo garante que ele meça aquilo que pretende medir, enquanto a confiabilidade garante e assegura que os resultados sejam exatos e repetíveis.

De Bruin *et al.* (2005) sugerem vários métodos de validação para garantir a confiabilidade do modelo, como estudos de caso, pesquisas e a própria revisão de literatura, concluindo, de modo geral, que a maneira ou modo pelo qual os testes são realizados, certamente varia entre os modelos.

V – Implantação

A quinta etapa combina a distribuição do modelo na prática comercial ao objetivo de determinar sua generalização. Nesse cerne, De Bruin *et al.* (2005) definiram a criação de um procedimento composto por duas etapas, o que garante sua aceitação geral, que consiste em aplicar o modelo a uma das partes interessadas e envolvidas no processo e em aplicá-lo a organizações que não participaram do desenvolvimento e teste do modelo.

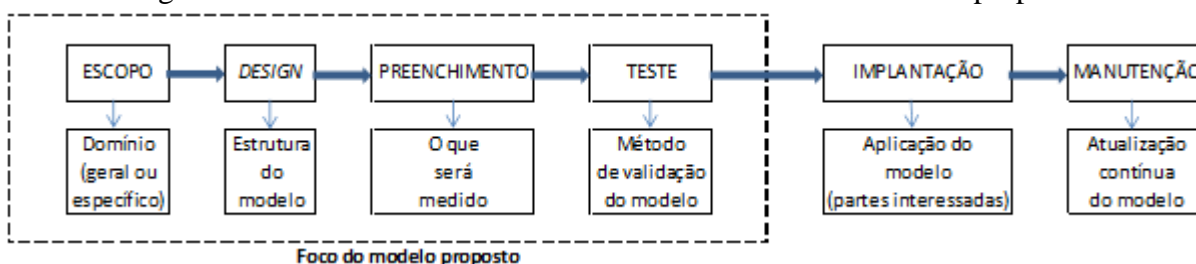
VI – Manutenção

A sexta etapa se refere à manutenção do modelo de maturidade, que é impactada pelos recursos necessários para sua atualização e utilização ao longo do tempo. Esses recursos, como repositório de dados, são necessários para suportar um possível grande volume de usuários do modelo.

A disponibilidade de recursos é determinada a partir da definição do escopo do modelo. Se o modelo estiver disponível de modo *on-line*, são necessários vários recursos para a atualização contínua de sua interface e para o acompanhamento da evolução tecnológica e de seu conteúdo.

A estrutura de De Bruin *et al.* (2005) serve como base metodológica para procedimentos adicionais. As quatro primeiras etapas (escopo, *design*, preenchimento e teste), que representam o desenvolvimento em um sentido mais restrito, serão descritas em detalhes para apresentar o foco na identificação do grau de homogeneidade dos membros de uma cadeia de *supply chain* no contexto da Indústria 4.0. A figura 4, a seguir, mostra que o foco do modelo proposto é limitado as quatro primeiras etapas da estrutura de De Bruin.

Figura 4 – Estrutura utilizada no desenvolvimento do modelo 4.0 proposto



Fonte: Elaboração própria (2020), adaptado de De Bruin *et al.*, (2005)

I – Escopo do modelo de maturidade

O escopo do modelo é projetado para empresas de manufatura e, portanto, é específico desse domínio. Essas empresas podem ser distinguidas com base em seu segmento de atuação. Neste trabalho aplicado, tratam-se de empresas do segmento de autopeças e seus fornecedores relevantes pertencentes a cadeias de suprimentos específicas, nomeadas de empresas Tier 1, que são os fornecedores diretos das montadoras de veículos, e empresas Tier 2, que são os fornecedores diretos das empresas Tier 1. Tal nomenclatura é amplamente utilizada no segmento automotivo e significa camada, nível, fila.

Como a maioria das organizações relacionadas à Indústria 4.0 segue uma abordagem fortemente direcionada à manufatura, o modelo em questão se concentra nesse cenário. Além disso, dois tipos de partes interessadas são considerados relevantes para o desenvolvimento do modelo: o meio acadêmico e a indústria. Portanto, para representar de forma adequada os profissionais, o processo de desenvolvimento baseia-se nas publicações disponíveis sobre esse contexto.

II – *Design* do modelo de maturidade

O público-alvo pode ser composto por executivos e pela gerência interna, pois esse grupo é responsável pelo desenvolvimento e pela manutenção dos recursos do Setor 4.0, além de auditores e consultores externos, posto que tais profissionais geralmente estão envolvidos na orientação de mudanças organizacionais.

Os principais alavancadores da aplicação do modelo são as dinâmicas de mercado que forcem as organizações a repensar seus modelos de negócios. Os participantes do instrumento de pesquisa ou das entrevistas são geralmente executivos, gerentes, funcionários de nível intermediário e especialistas, pelo fato de possuírem o conhecimento e as competências necessárias para avaliar os recursos atuais do setor 4.0.

O modelo pode ser aplicado a várias entidades (por exemplo, *sites* de produção) e em várias regiões. A proposta é de que o modelo possa ser usado com base na autoavaliação e também de forma guiada. Após os devidos esclarecimentos sobre o porquê e como o modelo é aplicado, os estágios de avaliação e as dimensões devem ser definidos. Para essa etapa, será feita uma referência à literatura anterior ao Setor 4.0 e ao modelo de maturidade, conforme mostrado a seguir.

a. Estágios da maturidade do modelo

Os estágios representam certo nível de maturidade e permitem a melhoria do domínio selecionado de maneira direcionada (FRASER *et al.*, 2002). Cada estágio de maturidade requer uma denotação apropriada e uma descrição geral.

Apesar de ser um domínio de pesquisa relativamente novo, a revisão da literatura encontrou vários modelos de maturidade já publicados, conforme demonstrado na seção 2.6 deste trabalho. Esses modelos disponibilizam informações sobre os critérios de maturidade e os métodos para sua mensuração.

Além dos modelos de maturidade identificados na literatura e relacionados à Indústria 4.0, a contribuição dos autores Schumacher, Erol e Sihni (2016) com o modelo Industry 4.0 Maturity se destaca pela grande abrangência sobre o tema, com suas nove dimensões descritas e consideradas nas seções anteriores. Dessa forma, o modelo proposto neste trabalho deve seguir com estágios de maturidade parcialmente relacionados ao modelo Industry 4.0 Maturity.

b. Dimensões do modelo de maturidade

As dimensões do modelo adicionam conteúdo específico aos estágios de maturidade definidos anteriormente. Ressalta-se que tais dimensões consistem em elementos ou atividades que permitem uma compreensão detalhada do fenômeno descrito (FRASER *et al.*, 2002). Metodologicamente, são necessárias uma denotação apropriada e uma definição geral de cada elemento (DE BRUIN *et al.*, 2005).

III – Preenchimento do modelo de maturidade

Várias publicações apresentam abordagens bem-sucedidas sobre a Indústria 4.0. As abordagens identificadas não são mutuamente exclusivas e incluem várias sobreposições. No entanto, essas semelhanças não são consideradas críticas, pois este estágio de desenvolvimento do modelo é focado na abrangência e não na segregação de conceitos.

Para verificar a relevância e testar a abrangência das abordagens identificadas, foi realizado um estudo empírico complementar. Com o apoio das partes interessadas (empresas de manufatura do segmento de autopeças), alguns colaboradores, especialistas nas metodologias de melhoria contínua, foram identificados e convidados a participar de uma pesquisa *on-line*.

O processo de pesquisa consistiu em duas partes. A primeira foi relacionada ao envio da proposta das perguntas do questionário, apenas para uma prévia avaliação por parte das empresas quanto à pertinência e à relevância das questões no contexto 4.0. Na segunda parte, um questionário foi aplicado aos colaboradores das empresas interessadas no processo, para o preenchimento de forma efetiva e estruturada.

IV – Teste do modelo de maturidade

Após o preenchimento, o modelo deverá ser testado quanto à validade e à confiabilidade (DE BRUIN *et al.*, 2005). Para a fase de desenvolvimento, este trabalho aplicado se vale dos estudos de Becker, Knackstedt e Poppelbub (1995), com a sugestão de utilização de princípios para o bom desenvolvimento de modelos, e dos estudos de Mettler (2010), apresentando critérios para caracterizar a qualidade de um modelo de maturidade. Os critérios considerados incluem compreensibilidade, abrangência, relevância, consistência, estrutura sistemática, detalhamento, confiabilidade conceitual e aplicabilidade.

2.10 Proposta de modelo de maturidade 4.0 para identificação do grau de homogeneidade entre os membros de uma cadeia de suprimentos

Com base nos estudos sobre modelos de maturidade descritos no item 2.7 e nos critérios exibidos no item 2.9, é apresentado a seguir o modelo de maturidade 4.0 elaborado para a identificação do grau de homogeneidade entre os membros de uma cadeia de suprimentos. A partir da síntese de modelos já existentes e apresentados neste tópico, o

modelo proposto é composto de seis dimensões: estratégia, estrutura e cultura organizacional; força de trabalho; fábricas inteligentes; processos inteligentes; produtos e serviços inteligentes; e tecnologia. Essas dimensões são brevemente descritas a seguir.

- Dimensão de estratégia, estrutura e cultura organizacional – relacionada aos aportes financeiros e investimentos direcionados ao desenvolvimento tecnológico e à qualificação dos colaboradores;
- Dimensão de força de trabalho – relacionada aos fatores humanos no contexto 4.0. Analisa o cenário da indústria relacionado às competências necessárias e às condições de trabalho para o desenvolvimento da fabricação digital na Indústria 4.0;
- Dimensão de fábricas inteligentes – relacionada a operações fabris que ganharam agilidade, dinamismo, autonomia na tomada de decisões e flexibilidade;
- Dimensão de processos inteligentes – relacionada às tecnologias responsáveis pelo processo de transformação dos produtos e aos recursos que serão utilizados na integração dos processos industriais;
- Dimensão de produtos e serviços inteligentes – relacionada aos diversos recursos que agregam o desenvolvimento dos produtos e serviços;
- Dimensão de tecnologia – relacionada a questões direcionadas à digitalização das informações.

Essas dimensões foram consolidadas por meio de uma comparação detalhada dos modelos existentes e relevantes avaliados neste trabalho. Foram considerados apenas os modelos que disponibilizam as dimensões utilizadas em sua composição, conforme demonstrado no quadro 2 da seção 2.7. Dessa forma, é possível sintetizar a análise das dimensões dos modelos existentes da seguinte forma:

- Dimensão *estratégia, estrutura e cultura organizacional*: utilizada em oito dos quinze modelos avaliados:
 - DREAMY (*Digital Readiness Assessment Maturity Model 4.0*) – De Carolis (2017);
 - *Maturity Index Industry 4.0* – Baseado na ACATECH – Schuh *et al.* (2017);
 - MM (*Maturity Model Industry 4.0*) – Baseado no SPICE – Gokalp *et al.* (2017);
 - *Industry 4.0 Maturity Model* – Schumacher *et al.* (2016);

- *The Digital Maturity Model 4.0* – Gill e VanBoskirk (2016)
- *Industry 4.0 Readiness* – Baseado no IMPULS – Lichtblau *et al.* (2015);
- MMI4 (*Maturity Modelo for Industry 4.0*) – Basseto (2019);
- *An Industry 4.0 Maturity Model Proposal* – Santos e Martinho (2019).

- Dimensão *força de trabalho*: utilizada em três dos quinze modelos avaliados:
 - *Industry 4.0 Maturity Model* – Schumacher *et al.* (2016);
 - *Industry 4.0 Readiness* – Baseado no IMPULS – Lichtblau *et al.* (2015);
 - *An Industry 4.0 Maturity Model Proposal* – Santos e Martinho (2019).

- Dimensão *fábricas inteligentes*: utilizada em três dos quinze modelos avaliados:
 - *Industry 4.0 Readiness* – Baseado no IMPULS – Lichtblau *et al.* (2015);
 - MMI4 (*Maturity Modelo for Industry 4.0*) – Basseto (2019);
 - *An Industry 4.0 Maturity Model Proposal* – Santos e Martinho (2019).

- Dimensão *processos inteligentes*: Utilizada em cinco modelos dos quinze modelos avaliados:
 - DREAMY (Digital Readiness Assessment Maturity Model 4.0) – De Carolis (2017);
 - MM (*Maturity Model Industry 4.0*) – Baseado no SPICE – Gokalp *et al.* (2017);
 - *Industry 4.0 Readiness* – Baseado no IMPULS – Lichtblau *et al.* (2015);
 - MMI4 (*Maturity Modelo for Industry 4.0*) – Basseto (2019);
 - *An Industry 4.0 Maturity Model Proposal* – Santos e Martinho (2019).

- Dimensão *produtos e serviços inteligentes*: utilizada em quatro dos quinze modelos avaliados:
 - SMMI4.0 (*System Integration Maturity Model Industry 4.0*) – Leyh *et al.* (2016)
 - *Industry 4.0 Maturity Model* – Schumacher *et al.* (2016);
 - *Industry 4.0 Readiness* – Baseado no IMPULS – Lichtblau *et al.* (2015);
 - *An Industry 4.0 Maturity Model Proposal* – Santos e Martinho (2019).

- Dimensão *tecnologia*: Utilizada em cinco modelos dos quinze modelos avaliados:
 - DREAMY (*Digital Readiness Assessment Maturity Model 4.0*) – De Carolis (2017);
 - SMMI4.0 (*System Integration Maturity Model Industry 4.0*) – Leyh *et al.* (2016)
 - *Industry 4.0 Maturity Model* – Schumacher *et al.* (2016);
 - *The Digital Maturity Model 4.0* – Gill e VanBoskirk (2016)
 - MMI4 (*Maturity Modelo for Industry 4.0*) – Basseto (2019);

Com base nessa síntese e levando em conta a recorrência dessas dimensões, foram definidas quais delas comporiam o modelo proposto por este trabalho. Para cada uma das dimensões, foram estabelecidos critérios para identificar o nível de maturidade, descritos no quadro 3, a seguir.

Quadro 3 – Descrição e características das dimensões em empresas 4.0

| DIMENSÃO | DESCRIÇÃO | CARACTERÍSTICAS |
|--|--|---|
| Estratégia, estrutura e cultura organizacional | A evolução para a Indústria 4.0 precisa de uma mudança de paradigmas do conselho de administração das empresas, por meio da promoção e da disseminação da cultura inovadora, da melhoria contínua, da disponibilidade de recursos necessários para implementar novas tecnologias de informação e operação, da adequação da estrutura organizacional e da busca constante pela satisfação dos clientes. Prevê-se que a cultura inovadora seja implementada de uma perspectiva de cima para baixo. | <ul style="list-style-type: none"> – Prática de novos modelos de negócios, integrando mudanças nas cadeias de valor; – Ênfase na organização das tarefas, na autonomia dos funcionários/colaboradores, na motivação, na definição de metas, na flexibilidade e na diversidade de habilidades da equipe, na colaboração por meio da cadeia de valor e na orientação ao cliente; – Valorização das características comportamentais desejadas nos funcionários, como liderança, comunicação aberta entre as equipes e adaptação às mudanças tecnológicas. |
| Força de trabalho | A transformação digital e o uso intensivo de tecnologias inovadoras não são possíveis sem a qualificação adequada e a atualização constante das habilidades técnicas, de gerenciamento e da força de | <ul style="list-style-type: none"> – Introdução de novas e melhores qualificações profissionais; – Desenvolvimento de plataformas apropriadas para o aprendizado; – Treinamento dos colaboradores em um ambiente virtual; – Geração de pensamento digital. |

| DIMENSÃO | DESCRIÇÃO | CARACTERÍSTICAS |
|----------------------------------|--|---|
| | trabalho. As equipes precisam ser abertas a tecnologias inovadoras e ter flexibilidade e autonomia para mudanças rápidas no contexto. | |
| Fábricas inteligentes | As fábricas do futuro, compostas por sensores e atuadores inteligentes e por instalações e equipamentos com sistemas embarcados e conectividade, possibilitarão a comunicação em tempo real entre máquinas, produtos, pessoas e infraestruturas, formando um ambiente de rede digital. | <ul style="list-style-type: none"> – Interação aperfeiçoada entre ser humano-máquina; – Utilização de robôs; – Novas formas de integração e operação dentro das fábricas. |
| Processos inteligentes | A conectividade e a interoperabilidade dos sistemas de informação e operação e dos equipamentos e instalações permitirão a existência de sistemas e processos autônomos e incorporados a algoritmos avançados de inteligência artificial. Além disso, contribuirão para o aprendizado contínuo das máquinas, permitindo a auto-otimização e a autoconfiguração dos processos de produção, manutenção, logística e suporte. | <ul style="list-style-type: none"> – Prática da manufatura flexível e ágil; – Adaptação automática a eventos não planejados, como interrupções inesperadas nas linhas de produção e reprogramações. |
| Produtos e serviços inteligentes | Produtos com sistemas embarcados inteligentes constituirão a base para a aquisição de dados em tempo real, permitindo a comunicação constante com os clientes, com a fábrica e com os processos produtivos da cadeia de valor. Serviços complementares, baseados em dados adquiridos e ativados por tecnologias de conectividade, serão uma fonte importante de receita para a empresa. | <ul style="list-style-type: none"> – Produtos e serviços desenvolvidos e habilitados por meio de sistemas de tecnologia da informação; – Atendimento às demandas customizadas dos clientes. |

| DIMENSÃO | DESCRIÇÃO | CARACTERÍSTICAS |
|------------|---|---|
| Tecnologia | Com as fábricas e os processos inteligentes, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias disruptivas e interconectadas, como CPS, IoT, <i>Big-Data</i> , <i>Big-Data Analysis</i> e CM. | <ul style="list-style-type: none"> – Utilização de sistemas de rastreabilidade com autogestão; – Comunicação simultânea entre peças de máquinas, produtos e equipamentos; – Utilização de CPS, IoT, <i>Big-Data</i>, CM e SS como agentes facilitadores na otimização da manufatura; – Geração da comunicação ampla entre fábricas ou membros da cadeia de suprimentos. |

Fonte: Elaboração própria (2020), baseado nos modelos de maturidade existentes e relevantes (quadro 2, seção 2.7)

Faz-se importante mencionar que as dimensões e os critérios apresentados foram construídos a partir das pesquisas expostas na seção 2.7. Com base nas dimensões acima descritas e nas respectivas características apresentadas para cada nível, foi construído o instrumento de pesquisa deste trabalho aplicado, conforme será explanado a seguir.

3 METODOLOGIA

3.1 Definições e adequação de abordagem

Miguel (2007) entende a metodologia como uma estratégia relacionada aos objetivos pretendidos e utilizada na definição da abordagem de uma pesquisa, que, por sua vez, se desenvolve por meio de um processo envolvendo diversas fases, tais como a correta formulação do problema, a apresentação dos resultados, a análise crítica e a apresentação das conclusões. Para Silva *et al.* (2015), o método é caracterizado pelas estratégias definidas para uma produção científica, analisando e compreendendo os dados com o objetivo de ratificar ou refutar alguma teoria existente. Em seu turno, a pesquisa é tida como a investigação, coleta e análise de fatos estruturados por um método.

Raupp e Beuren (2006) afirmam que os métodos de pesquisa são divididos em abordagens quantitativas e qualitativas. Os métodos quantitativos utilizam ferramentas estatísticas e realizam o levantamento e a análise de dados, com o objetivo de obter uma amostragem de resultados relacionados ao comportamento de uma determinada população.

Além disso, outra característica da abordagem quantitativa é a existência de hipóteses específicas e variáveis definidas (GODOY, 1995).

Já o método qualitativo é caracterizado pela oportunidade de um maior aprofundamento do estudo relacionado a determinado tema de pesquisa, ao contrário da análise quantitativa, que é mais superficial. Uma pesquisa qualitativa não foca seus esforços em numerar ou dimensionar unidades, por isso é a mais adequada para apresentar a natureza de fenômenos naturais (RAUPP; BEUREN, 2006). Segundo Godoy (1995), na abordagem qualitativa existe uma busca quanto à compreensão do tema por meio da perspectiva do sujeito relacionado ao fenômeno.

Segundo Creswell e Poth (2007), partindo-se do entendimento de que há limitações nos métodos de pesquisa, os pesquisadores admitem que os vieses pertinentes a um método podem se opor aos vieses oriundos de outros métodos, surgindo, dessa forma, a necessidade de triangulação das fontes de dados para buscar a convergência entre os métodos quantitativos e os qualitativos.

Os métodos de pesquisa mistos são oriundos da combinação entre os métodos predeterminados das pesquisas quantitativas com os métodos emergentes das pesquisas qualitativas, da mesma forma que misturam questões abertas e fechadas, e até mesmo de análises estatísticas e textuais. Assim sendo, existe a possibilidade de os instrumentos de coleta de dados serem ampliados com observações abertas, ou até mesmo de os dados censitários serem acompanhados por entrevistas exploratórias de forma mais profunda. Nesse método de pesquisa, os pesquisadores se baseiam na investigação, supondo que a coleta de diversos tipos de dados assegura um melhor entendimento sobre o problema pesquisado (CRESWELL; POTH, 2007).

A utilização dos métodos de pesquisa mistos tem aumentado nos últimos anos, mesmo ainda havendo problemas metodológicos e de delineamento em pesquisas dessa natureza. Nos dias de hoje, existe a necessidade de construir estudos de forma mais rigorosa, no momento de integração entre as evidências obtidas nas modalidades qualitativas e quantitativas, e também de ultrapassar as fronteiras existentes entre ambas, da mesma forma que acontece em estudos associados à força dos resultados confirmatórios de uma análise quantitativa multivariada, com descrições profundas e explanatórias obtidas por meio de análises qualitativas (CASTRO *et al.*, 2010).

São resumidas em nove itens, por Tashakkori e Teddlie (2010), as características gerais das pesquisas mistas, destacando três delas: o ecletismo metodológico; o pluralismo paradigmático; e o foco relacionado à questão específica de pesquisa para determinar o

método em qualquer estudo a ser empregado. Diante dessas especificidades, combinam-se os diferentes aspectos quantitativos e qualitativos devidamente focados no problema de pesquisa, respeitando as peculiaridades que determinam as características metodológicas definidas para se desenvolver o processo de investigação.

Desse modo, a pesquisa desenvolvida neste trabalho aplicado é caracterizada pela utilização do método misto, pois se vale do viés quantitativo ao utilizar o questionário como instrumento de pesquisa para a coleta de dados, possibilitando analisar e mensurar os resultados obtidos, e se vale também do viés qualitativo, pois aprofunda o estudo ao aplicar o questionário a um grupo específico de empresas multinacionais do segmento de autopeças e a pelo menos um de seus fornecedores relevantes, buscando identificar o nível de maturidade dessas empresas no que concerne aos conceitos da Indústria 4.0, e identificar o grau de homogeneidade existente entre os membros dessa cadeia de suprimentos.

3.2 Tipos de pesquisa

De acordo com Raupp e Beuren (2006), as pesquisas podem ser classificadas como exploratórias, descritivas e explicativas, sendo o objeto de trabalho o critério utilizado para escolha. A seguir são apresentadas as principais características de cada tipo de pesquisa.

- Pesquisa exploratória – sua utilização é mais indicada em casos em que não se possui grande conhecimento sobre o tema a ser tratado, sendo necessário buscar mais conhecimento para aumentar o nível de compreensão sobre o assunto;
- Pesquisa descritiva – não se apresenta tão profunda quanto a pesquisa explicativa nem tão preliminar quanto a pesquisa exploratória, porém, busca a identificação e a descrição de aspectos e comportamentos de uma determinada população, comparando a relação entre suas variáveis;
- Pesquisa explicativa – apresenta-se como a mais aprofundada entre os três modelos, principalmente pelo fato de buscar explicações sobre a razão da ocorrência de fenômenos e seus fatores.

Sobre a coleta de dados, Turrioni e Mello (2012) afirmam que toda pesquisa descritiva tem como objetivo principal a descrição das características relevantes de determinada população ou de determinado fenômeno, podendo estabelecer a existência de relações entre as variáveis. Assim sendo, pela forma como foi estruturada, a pesquisa deste trabalho aplicado é

classificada como descritiva. Usou-se um questionário para a obtenção/coleta e análise de dados como forma de avaliar o nível de maturidade das indústrias, uma vez que as perguntas foram focadas no cenário da Indústria 4.0.

Quanto à natureza, esta pesquisa é classificada como aplicada, pois, conforme Turrioni e Mello (2012), esse método tem como abordagem fundamental o interesse prático sobre o tema, buscando resultados que auxiliem em sua aplicação e que sejam devidamente utilizados na solução de problemas reais nas organizações. Este trabalho aplicado também fornecerá um mapeamento do *statu quo* das organizações dentro do contexto da Indústria 4.0, provendo sugestões inovadoras para seu avanço organizacional. Dessa forma, é possível apresentar, de maneira resumida, as especificidades desta pesquisa do seguinte modo:

- Quanto à natureza – pesquisa mista;
- Quanto ao método: pesquisa aplicada;
- Quanto à coleta de dados: pesquisa descritiva.

Neste tópico, detalha-se a metodologia usada para desenvolver a pesquisa em questão. Em um primeiro momento, descreve-se seu contexto de realização e em seguida explanam-se as etapas que foram realizadas para chegar aos resultados apresentados no presente trabalho.

Ao longo das etapas, será explicada a metodologia utilizada na construção do modelo de maturidade, que permite definir qual é o nível de maturidade de uma empresa dentro do contexto da Indústria 4.0 e que possibilita a identificação do grau de homogeneidade existente entre os membros de uma cadeia de suprimentos, seus possíveis desbalanceamentos e suas prováveis causas.

3.3 Caracterização da pesquisa

De modo geral, este estudo busca o entendimento necessário para caracterizar a Indústria 4.0, bem como seus principais componentes, visando o desenvolvimento e a construção de um modelo de maturidade que também identifique o grau de maturidade existente entre os membros de uma cadeia de suprimentos.

3.4 Etapas da pesquisa

Considerando os objetivos fundamentais deste trabalho e com base nas necessidades identificadas no tópico 1, pretende-se desenvolver um modelo de maturidade que atenda as necessidades das indústrias e que esteja inserido no contexto 4.0. Assim, o desenvolvimento desta pesquisa ocorre em quatro etapas distintas e apresentadas no quadro 4 a seguir.

Quadro 4 – Descrição das etapas do desenvolvimento da pesquisa

| ETAPAS DA PESQUISA | DESCRIÇÃO DAS ETAPAS |
|--------------------|--|
| Etapa 1 | Desenvolvimento do modelo de maturidade |
| Etapa 2 | Proposição do instrumento de pesquisa |
| Etapa 3 | Aplicação do instrumento de pesquisa/coleta de dados |
| Etapa 4 | Critério de análise dos dados |

Fonte: Elaboração própria (2020)

3.4.1 Etapa 1 – Desenvolvimento do modelo de maturidade

Para propor o modelo de maturidade, foi feita a revisão bibliográfica de estudos já realizados sobre o tema da Indústria 4.0. Nesse contexto, este estudo está fundamentado na pesquisa da ciência do *design* (DSR), que segundo Van Aken (2005), é direcionada para a solução de problemas, tendo como base o resultado de pesquisas que são orientadas para a descrição de disciplinas explicativas e de apoio, bem como os próprios esforços. Para essas disciplinas, o objetivo final no meio acadêmico é a geração de conhecimento que possa ser utilizado no *design* de soluções para problemas de campo.

A metodologia adotada neste estudo foi baseada no processo de desenvolvimento do modelo de maturidade de De Bruin *et al.* (2005), apresentado na seção 2.9 deste trabalho, sendo este modelo aplicável a diversos domínios do conhecimento, não se restringindo, portanto, ao domínio Indústria 4.0. Essa metodologia foi utilizada por vários autores em diferentes domínios, como O'Donovan, Bruton e O'Sullivan (2016), no Industrial Analytics Maturity Model; Mamoghli e Cassivi (2018), no suporte aos processos de negócios por meio de fatores humanos e de TI; e Asdecker e Felch (2018), no processo de entrega nas cadeias de suprimentos. Por fim, é válido ressaltar que esta etapa da pesquisa levou à elaboração das seis dimensões do modelo proposto descritas na seção 2.10.

3.4.2 Etapa 2 – Proposição do instrumento de pesquisa

Nesta etapa do trabalho, são desenvolvidas a proposta do instrumento de pesquisa e a composição estrutural do modelo. Nesse sentido, é realizada a coleta de informações vindas das indústrias, buscando avaliar seu nível de maturidade no contexto da Indústria 4.0.

Optou-se pela utilização de questionário como instrumento de coleta de dados e informações, pois ele apresenta vantagens quando comparado aos demais instrumentos disponíveis, como entrevistas, registros institucionais e observações estruturadas (DEBOIS, 2017). Tais vantagens consistem na liberdade no tempo de resposta pelos respondentes, na possibilidade de replicação, na maior exatidão nas respostas e na praticidade na aplicação. Além disso, o questionário garante, também, o anonimato da indústria envolvida e dos respondentes participantes.

Assim, partindo dessas premissas, da revisão da literatura e da validação das perguntas por especialistas da Indústria 4.0, promoveu-se a elaboração do questionário, que possibilitará a avaliação do *statu quo* da indústria relacionado ao seu nível de maturidade no contexto da Indústria 4.0. Nesse sentido, cabe ressaltar que a revisão da literatura foi utilizada para identificar potenciais antecedentes ou facilitadores na formulação de modelos de maturidade no contexto da Indústria 4.0.

A realização da avaliação, com base nos itens de maturidade dentro de uma empresa, foi executada por meio desse questionário, constituído por perguntas fechadas, requerendo para cada uma delas uma resposta baseada em uma escala do tipo Likert, devidamente adaptada, indo de 0, “não concorda”, até 5, “concorda totalmente”. Apresenta-se no quadro 5, a seguir, uma mostra de como foi estruturado o questionário.

Quadro 5 – Exemplo de pergunta do questionário sobre o nível de maturidade na Indústria 4.0

| Pergunta externa | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|---|
| Em sua empresa, os processos industriais com M2M realizam trocas de informação integrada em tempo real | | | | | | |

Fonte: Elaboração própria (2020)

A escala Likert ou escala de Likert tem esse nome devido à publicação feita por Rensis Likert de um relatório explicando seu uso. Ela consiste em um tipo de escala de resposta psicométrica usada habitualmente em questionários, sendo a mais adotada em

pesquisas de opinião. Ao responder a um questionário baseado nessa escala, os perguntados especificam seu nível de concordância com uma afirmação (BERMUDES *et al.*, 2016).

Faz-se necessário ressaltar que o questionário somente deve ser respondido de forma adequada, com os entrevistados ou respondentes possuindo um entendimento pleno sobre o assunto, no caso, os conceitos da Indústria 4.0. As respostas obtidas funcionam como uma entrada de dados para o gráfico de radar, que representará o nível de maturidade das empresas em questão em suas cadeias de suprimentos.

O questionário deste trabalho aplicado está disponível integralmente no Apêndice A, sendo composto por 66 perguntas fechadas, com possibilidade de seis respostas diferentes para cada uma delas, de acordo com a adaptação da escala de Likert. As perguntas, por sua vez, foram devidamente divididas nas seis dimensões estabelecidas para utilização neste trabalho, a saber: estratégia, estrutura e cultura organizacional; força de trabalho; fábricas inteligentes; processos inteligentes; produtos e serviços inteligentes; e tecnologia.

Para contemplar as seis dimensões que compõem o modelo adotado neste trabalho, as perguntas foram elaboradas a partir de duas propostas de questionário já existentes na literatura sobre o tema Indústria 4.0. Uma delas consiste no trabalho apresentado por Santos e Martinho (2019), cujo questionário contém 41 perguntas divididas em cinco dimensões: estratégia, estrutura e cultura organizacional; força de trabalho; fábricas inteligentes; processos inteligentes e produtos e serviços inteligentes. A outra proposta de questionário que serviu como base para este trabalho foi feita por Basseto (2019). Esse autor apresentou um questionário com 28 perguntas que abrangem quatro dimensões: tecnologia; processo; produto e estratégia da organização. Tais dimensões foram inicialmente definidas por meio modelo CMMI, em que os níveis de maturidade representam o *status* da indústria dentro do contexto da Indústria 4.0.

3.4.3 Etapa 3 – Aplicação do instrumento de pesquisa/coleta de dados

Esta etapa tem como objetivo principal apresentar a aplicação do modelo proposto e os resultados obtidos a partir dessa aplicação. Faz-se necessário ressaltar que o questionário foi respondido apenas por entrevistados que possuíam um entendimento pleno sobre os conceitos da Indústria 4.0.

Em maio de 2020, os entrevistados foram contactados previamente por telefone pelo pesquisador para serem convidados a participar da pesquisa, caso conhecessem os conceitos

da Indústria 4.0 e houvesse interesse. Foram os participantes que fizeram a validação das perguntas do questionário, não reportando nenhum ajuste a ser feito no material elaborado.

As empresas contactadas, por sua vez, enviaram o questionário para pelo menos um de seus fornecedores relevantes. A escolha foi feita pelos participantes, que selecionaram os maiores fornecedores de suas cadeias de suprimentos.

Ainda em maio de 2020, o questionário foi enviado por *e-mail* aos funcionários participantes e as respostas obtidas funcionaram como entrada de dados para a análise do *statu quo* das indústrias. Esses dados foram representados por meio de gráficos de radar, visando descrever o nível de maturidade das empresas em questão em suas cadeias de suprimentos.

3.4.3.1 Caracterização das empresas no contexto da Indústria 4.0

As empresas escolhidas para participar deste trabalho aplicado estão localizadas na região da Grande São Paulo (SP). Por meio de conversas telefônicas com seus funcionários, em maio de 2020, obteve-se a informação de que todas elas já estão inseridas no contexto da Indústria 4.0.

O questionário foi aplicado em maio de 2020 em três empresas consideradas principais dentro da cadeia de suprimentos de autopeças e em pelo menos um de seus fornecedores. Todas as empresas participantes fazem parte do segmento automotivo, sendo elas fabricantes de autopeças, embora os fornecedores selecionados forneçam produtos também para outros segmentos de mercado.

Para garantir o anonimato, as empresas participantes foram nomeadas como Tier 1A, Tier 2A, Tier 1B, Tier 2B, Tier 1C e Tier 2C. A seguir, com base em informações obtidas em seus respectivos *sites* oficiais, apresenta-se uma breve descrição de cada uma delas.

- A empresa Tier 1A é de origem alemã, com presença global, e fabrica componentes para motores. Seu fornecedor escolhido, a empresa Tier 2A, também é de origem alemã, com presença global, e fabrica aços laminados;
- A empresa Tier 1B é de origem sueca, com presença global, e fabrica componentes para suspensão e vedações. Seu fornecedor escolhido, a indústria Tier 2B, é de origem nacional, porém com presença global, e fabrica aços especiais;

- A empresa Tier 1C é de origem americana, com presença global, e fabrica *clusters e displays*. Seu fornecedor escolhido, a indústria Tier 2C, é de origem nacional, apenas com presença local, e fabrica componentes plásticos injetados.

-

No quadro 6, a seguir, são demonstradas informações adicionais sobre as empresas participantes.

Quadro 6 – Informações relevantes sobre as empresas respondentes do questionário

| Empresa | Segmento de atuação | Produto | Origem/ Fundação | Porte | Quantidade de funcionários | Cargo/ função dos respondentes |
|---------|------------------------|------------------------------------|----------------------|---------|----------------------------|---|
| Tier 1A | Automotivo (autopeças) | Componentes motores | Alemã 1920 | Grande | 78.000 | Gerente de Qualidade; Gestor de Engenharia e Gestor de Laboratórios |
| Tier 2A | Industrial | Aços Laminados | Alemã 1829 | Médio | 2.400 | Gerente de Produção |
| Tier 1B | Automotivo (autopeças) | Componentes de suspensão e vedação | Suécia 1907 | Grande | (+) 10.000 | Leader de Produção; Gestor de Logística e Melhoria Contínua |
| Tier 2B | Industrial | Aços especiais | Nacional 1901 | Grande | (+) 10.000 | Gestor de Compras e Gestor Logística |
| | | | | | | Gestor de Logística |
| Tier 1C | Automotivo (autopeças) | <i>Clusters displays</i> | Norte-americana 2000 | Grande | 11.000 | Gestor Engenharia KAM; Gestor de Tecnologia e Gestor de Logística |
| Tier 2C | Industrial | Componentes injetados plásticos | Nacional 1993 | Pequeno | 850 | Gestor de Engenharia |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Como se trata de um tema relevante para essas organizações, o tempo de retorno foi relativamente rápido, cerca de dois dias, em média. Não houve críticas ou sugestões apresentadas pelos participantes desta etapa do processo, por isso não foram necessárias alterações no documento. Em seguida, o questionário validado foi encaminhado para o mesmo grupo de pessoas inicialmente contatadas, desta vez para responderem-no de forma efetiva. Esses respondentes assumiram a responsabilidade de encaminhar o questionário para pelo um dos fornecedores mais relevantes nas cadeias de suprimentos em que atuam para que pudessem também respondê-lo. Os fornecedores, por sua vez, aceitaram participar da pesquisa por intermédio dos seus clientes, mantendo o anonimato e sem ter contato direto com o pesquisador.

3.4.4 Etapa 4 – Critérios de análise dos dados

Para analisar as respostas do questionário, a escala Likert será entendida como uma pontuação que varia de 0 até 5. A resposta 0 será equivalente ao *status* crítico; a 1 ao *status* inicial; a 2 ao *status* de alerta; a 3 ao *status* aceitável; a 4 ao *status* ótimo; e a 5 ao *status* ideal.

Esses *status* são propostos na metodologia CMMI apresentada no modelo DREAMY de De Carolis *et al.* (2017), conforme exposto na seção 2.7.2 deste material, na qual cada pontuação está relacionada ao *status* de evolução da indústria no contexto da maturidade na Indústria 4.0.

Para realizar uma representação gráfica e de forma bidimensional, foi adotado o método geométrico desenvolvido por Masaaki Miyamoto e divulgado por Albach (1987): o gráfico de radar. Esse tipo de gráfico é um procedimento de forma original e demonstra ser um considerável avanço para o controle gerencial, tendo se tornado o método mais indicado para a demonstração e a comparação de avaliações de desempenho nas indústrias e nas organizações econômicas (ORNSTEIN, 1989).

4 ANÁLISE DOS DADOS

Neste tópico, serão apresentados os resultados obtidos com o retorno dos questionários devidamente respondidos. Dessa forma, será possível iniciar as análises relacionadas ao nível de maturidade dos membros de uma cadeia de suprimentos. Os resultados serão apresentados na forma gráfica, por meio de gráficos de radar, e os resultados serão, inicialmente, divididos em cinco grupos.

- Gráfico de radar 1 – resultados obtidos dos participantes Tier 1A e Tier 2A
- Gráfico de radar 2 – resultados obtidos dos participantes Tier 1B e Tier 2B
- Gráfico de radar 3 – resultados obtidos dos participantes Tier 1C e Tier 2C
- Gráfico de radar 4 – resultados obtidos dos participantes Tier 1A, 1B e 1C
- Gráfico de radar 5 – resultados obtidos dos participantes Tier 2A, 2B e 2C

4.1 Análise detalhada da maturidade das empresas participantes Tier 1A e Tier 2A

O gráfico de radar 01 demonstra os resultados obtidos com os participantes das empresas Tier 1A e Tier 2A. Analisando-o, fica evidenciado que, para os respondentes da empresa Tier 1A, a dimensão 1, estratégia, estrutura e cultura organizacional, apresenta a maior representatividade, e a dimensão 3, fábricas inteligentes, apresenta a menor. As dimensões 2 e 4, força de trabalho e processos inteligentes, respectivamente, ficam em um nível bem próximo e mediano de representatividade dentro dos conceitos 4.0. A dimensão 5, produtos e serviços inteligentes, obteve a segunda melhor pontuação de representatividade e a dimensão 6, tecnologia, apresentou a segunda pior avaliação de representatividade.

Para o fornecedor respondente da empresa Tier 2A, a dimensão 1 também apresenta a maior representatividade. A dimensão 3 possui a pior nota de avaliação, e as dimensões 2 e 4 ficam quase empatadas em um nível mediano de representatividade. A dimensão 5, por sua vez, tem a segunda melhor avaliação, enquanto a dimensão 6 exibe a segunda pior nota de avaliação de representatividade dentro dos conceitos 4.0.

Gráfico 1 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 1A e Tier 2 A

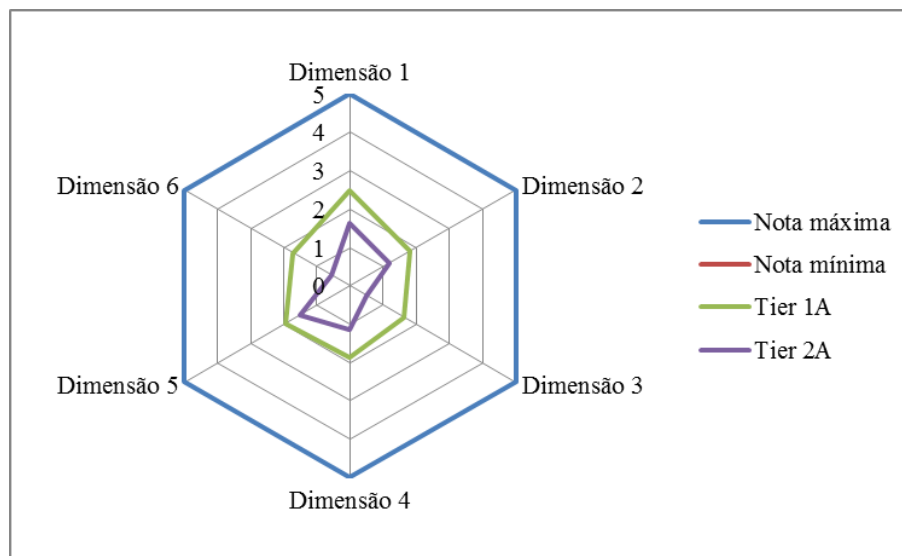


Tabela 1 – Descrição do gráfico de radar 1

| Gráfico de radar 1 | Dimensão 1 | Dimensão 2 | Dimensão 3 | Dimensão 4 | Dimensão 5 | Dimensão 6 |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Nota máxima | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Nota mínima | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tier 1A | 2,50 | 1,80 | 1,63 | 1,86 | 1,96 | 1,71 |
| Tier 1A – Variância média | 1,67 | 1,23 | 0,90 | 1,78 | 2,70 | 2,01 |
| Tier 1A – Desvio padrão | 1,29 | 1,11 | 0,95 | 1,33 | 1,64 | 1,42 |
| Tier 2A | 1,63 | 1,2 | 0,5 | 1,14 | 1,5 | 0,57 |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Quadro 7 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 1

| | |
|------------|--|
| Dimensão 1 | Estratégia, estrutura e cultura organizacional |
| Dimensão 2 | Força de trabalho |
| Dimensão 3 | Fábricas inteligentes |
| Dimensão 4 | Processos inteligentes |
| Dimensão 5 | Produtos e serviços inteligentes |
| Dimensão 6 | Tecnologia |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Por meio das respostas obtidas, é possível observar que a empresa Tier 1A, mesmo apresentando uma média relativamente baixa de pontuação nas seis dimensões avaliadas, tendo como maior nota 2,50 na dimensão 1, está consideravelmente a frente de seu fornecedor Tier 2A, que também obteve sua melhor pontuação na dimensão 1, porém com nota 1,63.

A análise dos pontos fortes e dos pontos a serem melhorados na empresa Tier 1A mostra um foco na estratégia, estrutura e cultura organizacional, com certa ênfase em produtos e serviços inteligentes. No entanto, existe uma demonstração de que a empresa ainda necessita de investimentos em *tecnologia* em suas operações, devendo se transformar em uma *fábrica inteligente*. Essa análise também demonstra haver certo enfoque da empresa no desenvolvimento de processos inteligentes, não deixando de lado a responsabilidade no desenvolvimento da força de trabalho nos conceitos 4.0.

O fornecedor Tier 2A também identifica, por meio das respostas obtidas, certo foco da organização em estratégia, estrutura e cultura organizacional. Os quesitos tecnologia e fábricas inteligentes, todavia, aparentemente não fazem parte das estratégias organizacionais, pois foram avaliados como sendo os mais críticos em relação aos pontos a serem melhorados. Em contrapartida, nota-se certo foco no desenvolvimento da força de trabalho e na busca de melhorias nos processos inteligentes.

Ao observar os valores de variância e de desvio padrão, obtidos por meio das respostas do questionário, é possível identificar que as dimensões 5 e 6, produtos e serviços inteligentes e tecnologia, apresentam os valores mais elevados, 2,70 e 2,01 (relacionados à variância) e 1,64 e 1,42 (relacionados ao desvio padrão), respectivamente. Já as dimensões 1 e 4, estratégia, estrutura e cultura organizacional e processos inteligentes, ficam praticamente empatadas, apresentando a terceira e quarta avaliação mais elevada, com 1,67 e 1,78 (relacionados à variância) e 1,29 e 1,33 (relacionados ao desvio padrão), respectivamente. Em contrapartida, as dimensões 2 e 3, força de trabalho e fábricas inteligentes, apresentam as menores notas obtidas, 1,23 e 0,90 (relacionadas à variância) e 1,11 e 0,95 (relacionadas ao desvio padrão), respectivamente.

Esses resultados podem demonstrar não haver um perfeito entendimento, pelos respondentes da empresa principal Tier 1A, sobre o estágio de implementação dos conceitos 4.0 em que a empresa se encontra, principalmente no que concerne às dimensões 1, 4, 5 e 6 respectivamente, pois elas apresentam valores superiores a 1,67 de variância, chegando até 2,70, e valores maiores que 1,29 relacionados ao desvio padrão, chegando até 1,64. Sugere-se que a empresa principal Tier 1A defina uma estratégia de divulgação, para os seus colaboradores, das ações implementadas pela empresa relacionadas aos conceitos da Indústria 4.0. Dessa forma, haverá uma maior coesão quanto às respostas disponibilizadas pelos respondentes do questionário. Outra hipótese é a de que a percepção individual de cada um dos respondentes sobre essa dimensão seja diferente.

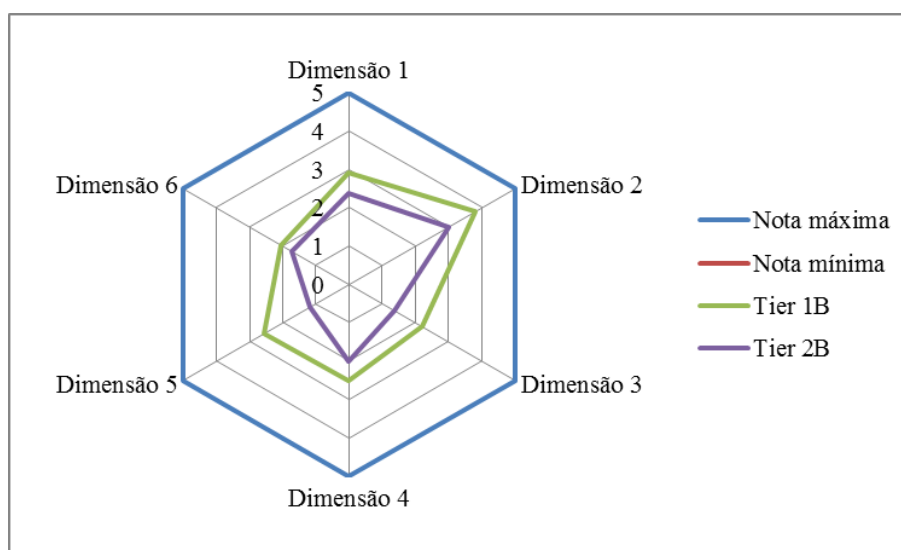
Para a empresa fornecedora Tier 2A, não foi possível realizar a avaliação relacionada à variância e ao seu desvio padrão, visto que apenas um colaborador dessa empresa respondeu ao questionário.

4.2 Análise detalhada da maturidade das empresas participantes Tier 1B e Tier 2B

O gráfico de radar 02 demonstra os resultados obtidos com os participantes das empresas Tier 1B e Tier 2B. Analisando-o, fica evidenciado que, para os respondentes da empresa Tier 1B, a dimensão 2, força de trabalho, apresenta a maior representatividade, e a dimensão 6, tecnologia, apresenta a pior nota de avaliação. As dimensões 4 e 5, processos inteligentes e produtos e serviços inteligentes, respectivamente, ficam em um nível bem próximo e mediano de representatividade dentro dos conceitos 4.0. A dimensão 1, estratégia, estrutura e cultura organizacional, obteve a segunda melhor pontuação de representatividade e a dimensão 3, fábricas inteligentes, apresentou a segunda pior avaliação de representatividade.

Para o fornecedor respondente da empresa Tier 2B, a dimensão 2 também apresenta a maior representatividade. A dimensão 5 possui a pior nota de avaliação, e as dimensões 4 e 6 ficam quase empatadas em um nível mediano de representatividade. A dimensão 1, por sua vez, tem a segunda melhor avaliação, enquanto a dimensão 3 exibe a segunda pior nota de avaliação de representatividade dentro dos conceitos 4.0.

Gráfico 2 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 1B e Tier 2B



Fonte: Elaboração própria (2020)

Tabela 2 – Descrição do gráfico de radar 2

| Gráfico de radar 2 | Dimensão 1 | Dimensão 2 | Dimensão 3 | Dimensão 4 | Dimensão 5 | Dimensão 6 |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Nota máxima | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Nota mínima | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tier 1B | 2,92 | 3,80 | 2,21 | 2,52 | 2,56 | 2,05 |
| Tier 1B – Variância média | 1,24 | 0,96 | 2,91 | 2,20 | 2,58 | 1,95 |
| Tier 1B – Desvio padrão | 1,11 | 0,98 | 1,71 | 1,48 | 1,61 | 1,40 |
| Tier 2B | 2,38 | 3,00 | 1,4 | 2,00 | 1,19 | 1,71 |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Quadro 8 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 2

| | |
|------------|--|
| Dimensão 1 | Estratégia, estrutura e cultura organizacional |
| Dimensão 2 | Força de trabalho |
| Dimensão 3 | Fábricas inteligentes |
| Dimensão 4 | Processos inteligentes |
| Dimensão 5 | Produtos e serviços inteligentes |
| Dimensão 6 | Tecnologia |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Por meio das respostas obtidas, é possível observar que a empresa Tier 1B possui uma pontuação geral média nas seis dimensões avaliadas, tendo como maior nota 3,80 na dimensão 2. A empresa Tier 1B está à frente de seu fornecedor Tier 2B, que também obteve sua melhor pontuação na dimensão 2, com nota 3,00.

A análise dos pontos fortes e dos pontos a serem melhorados na empresa Tier 1B mostra um foco na capacitação de sua força de trabalho, com certa ênfase em estratégia, estrutura e cultura organizacional. No entanto, existe uma demonstração de que a empresa ainda necessita de investimentos em tecnologia em suas operações, devendo se transformar em uma fábrica inteligente. Essa análise também demonstra haver certo enfoque da empresa no desenvolvimento de produtos e serviços inteligentes, não deixando de lado a visão sobre a responsabilidade no desenvolvimento de processos inteligentes.

O fornecedor Tier 2B também identifica, por meio das respostas obtidas, certo foco da organização em força de trabalho. Os quesitos produtos e serviços inteligentes e fábricas inteligentes, todavia, aparentemente não fazem parte das estratégias organizacionais, pois foram avaliados como sendo os mais críticos em relação aos pontos a serem melhorados. Em contrapartida, nota-se um leve foco no desenvolvimento de processos inteligentes, por meio de investimentos modestos em tecnologia.

Observam-se, também, os valores de variância e de desvio padrão, obtidos por meio das respostas do questionário. É possível identificar que as dimensões 3 e 5, fábrica inteligentes e produtos e serviços inteligentes, apresentam os valores mais elevados de variância e desvio padrão, 2,91 e 2,58 (relacionados à variância) e 1,71 e 1,61 (relacionados ao desvio padrão), respectivamente. As dimensões 4 e 6, estratégia, estrutura e cultura organizacional e processos inteligentes, ficam praticamente empatadas, apresentando a terceira e quarta avaliação mais elevada de variância e de desvio padrão, com 2,20 e 1,95 (relacionados à variância) e 1,48 e 1,40 (relacionados ao desvio padrão), respectivamente. Em contrapartida, as dimensões 1 e 2, estratégia, estrutura e cultura organizacional e força de trabalho, apresentam as menores notas obtidas, 1,24 e 0,96 (relacionadas à variância), 1,11 e 0,98 (relacionadas ao desvio padrão), respectivamente.

Esses resultados podem demonstrar não haver um perfeito entendimento, pelos respondentes da empresa principal Tier 1B, sobre o estágio de implementação dos conceitos 4.0 em que a empresa se encontra, principalmente no que concerne às dimensões 3, 4, 5 e 6 respectivamente, pois elas apresentam valores superiores a 1,95 de variância, chegando até 2,91, e valores maiores que 1,40, relacionados ao desvio padrão, chegando até 1,71. Sugere-se que a empresa principal Tier 1B, defina uma estratégia de divulgação, aos seus colaboradores, dos avanços obtidos pela empresa relacionados à implementação dos conceitos da Indústria 4.0. Dessa forma, haverá uma maior coesão quanto às respostas disponibilizadas pelos respondentes do questionário.

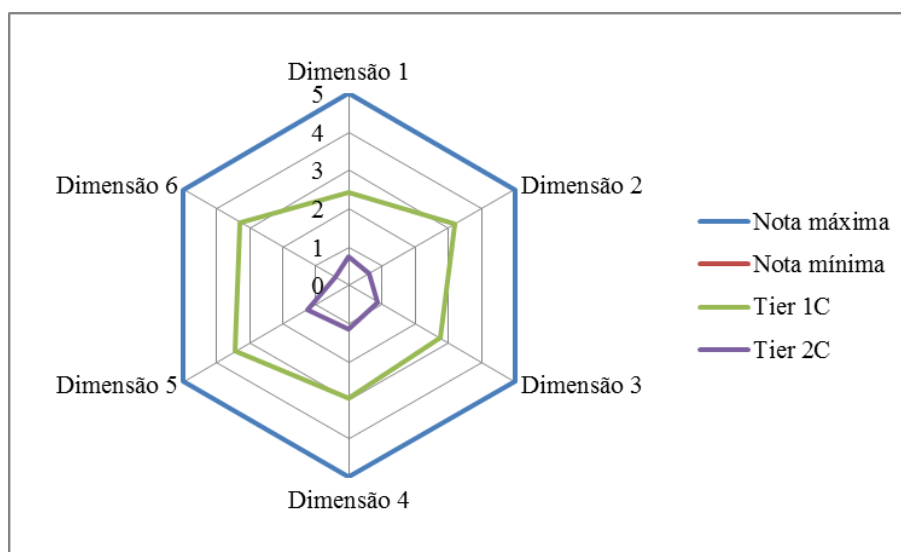
Para a empresa fornecedora Tier 2B, não foi possível realizar a avaliação relacionada à variância e ao desvio padrão, visto que apenas um colaborador dessa empresa respondeu ao questionário.

4.3 Análise detalhada da maturidade das empresas participantes Tier 1C e Tier 2C

O gráfico de radar 03 demonstra os resultados obtidos com os participantes das empresas Tier 1C e Tier 2C. Analisando-o, fica evidenciado que, para os respondentes da empresa Tier 1C, a dimensão 5, produtos e serviços inteligentes, apresenta a maior representatividade, e a dimensão 1, estratégia, estrutura e cultura organizacional, apresenta a pior nota de avaliação. As dimensões 3 e 4, fábricas inteligentes e processos inteligentes, respectivamente, ficam em um nível bem próximo, porém mais elevado, de representatividade dentro dos conceitos 4.0. As dimensões 2 e 6, força de trabalho e tecnologia, respectivamente, obtêm a segunda melhor pontuação de representatividade, praticamente empatadas.

Para o fornecedor respondente da empresa Tier 2C, a dimensão 5 também apresenta a maior representatividade. A dimensão 6 possui a pior nota de avaliação, e as dimensões 1 e 3 ficam quase empatadas em um nível baixo de representatividade. A dimensão 4, por sua vez, tem a segunda melhor avaliação, enquanto a dimensão 2 exibe a segunda pior nota de avaliação de representatividade dentro dos conceitos 4.0.

Gráfico 3 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 1C e Tier 2C



Fonte: Elaboração própria (2020)

Tabela 3 – Descrição do gráfico de radar 3

| Gráfico de radar 3 | Dimensão 1 | Dimensão 2 | Dimensão 3 | Dimensão 4 | Dimensão 5 | Dimensão 6 |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Nota máxima | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Nota mínima | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tier 1C | 2,44 | 3,20 | 2,75 | 2,93 | 3,44 | 3,29 |
| Tier 1C – Variância média | 0,84 | 1,31 | 1,23 | 0,95 | 0,80 | 0,82 |
| Tier 1C – Desvio padrão | 0,92 | 1,14 | 1,11 | 0,97 | 0,89 | 0,90 |
| Tier 2C | 0,75 | 0,6 | 0,88 | 1,14 | 1,25 | 0,43 |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Quadro 9 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 3

| | |
|------------|--|
| Dimensão 1 | Estratégia, estrutura e cultura organizacional |
| Dimensão 2 | Força de trabalho |
| Dimensão 3 | Fábricas inteligentes |
| Dimensão 4 | Processos inteligentes |
| Dimensão 5 | Produtos e serviços inteligentes |
| Dimensão 6 | Tecnologia |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Por meio das respostas obtidas, é possível observar que a Indústria Tier 1C possui uma pontuação geral média mais elevada nas seis dimensões avaliadas, tendo como maior nota 3,44 na dimensão 5. Nesse sentido, a empresa Tier 1C empata, porém num nível mais elevado, com seu fornecedor Tier 2C, que também obteve sua melhor pontuação na dimensão 5, com nota 1,25.

A análise dos pontos fortes e dos pontos a serem melhorados na empresa Tier 1C mostra um foco em produtos e serviços inteligentes claramente conectados à capacitação de sua força de trabalho, com investimentos relacionados à tecnologia. Também há certa ênfase em fábricas e processos inteligentes, mas a análise demonstra haver a necessidade de uma atuação mais direcionada em estratégia, estrutura e cultura organizacional, que são percebidos como pontos a serem melhorados no contexto 4.0.

O fornecedor Tier 2C também identifica, por meio das respostas obtidas, o foco da organização em produtos e serviços inteligentes e no desenvolvimento de processos inteligentes. O quesito tecnologia, no entanto, aparentemente não recebe foco. Em consequência disso, também existe a falta de disposição para a capacitação da força de trabalho. De certa forma, a dimensão estratégia, estrutura e cultura organizacional também apresenta baixo nível de dedicação, acarretando a não transformação de suas operações em fábricas inteligentes.

Observam-se, também, os valores de variância e de desvio padrão obtidos por meio das respostas do questionário. É possível identificar que as dimensões 2 e 3, força de trabalho e fábricas inteligentes, apresentam os valores mais elevados de variância e de desvio padrão, 1,31 e 1,23 (relacionados à variância) e 1,14 e 1,11 (relacionados ao desvio padrão), respectivamente. As dimensões 1, 4, 5 e 6, estratégia, estrutura e cultura organizacional, processos inteligentes, produtos e serviços inteligentes e tecnologia, ficam praticamente empatadas quanto aos resultados obtidos de variância e desvio padrão, com 0,84, 0,95, 0,80 e 0,82 (relacionados à variância) e 0,92, 0,97, 0,89 e 0,90 (relacionados ao desvio padrão), respectivamente.

Esses resultados podem demonstrar haver um melhor entendimento, pelos respondentes da empresa principal Tier 1C, sobre o estágio de implementação dos conceitos 4.0 em que a empresa se encontra, principalmente quando relacionado às dimensões 1, 4, 5 e 6, respectivamente, pois elas apresentam valores inferiores a 0,95 de variância e a 0,97 de desvio padrão. Sugere-se que a empresa principal Tier 1A defina uma estratégia de divulgação, aos seus colaboradores, dos avanços obtidos pela empresa relacionados à implementação dos conceitos da Indústria 4.0, principalmente no que concerne às dimensões

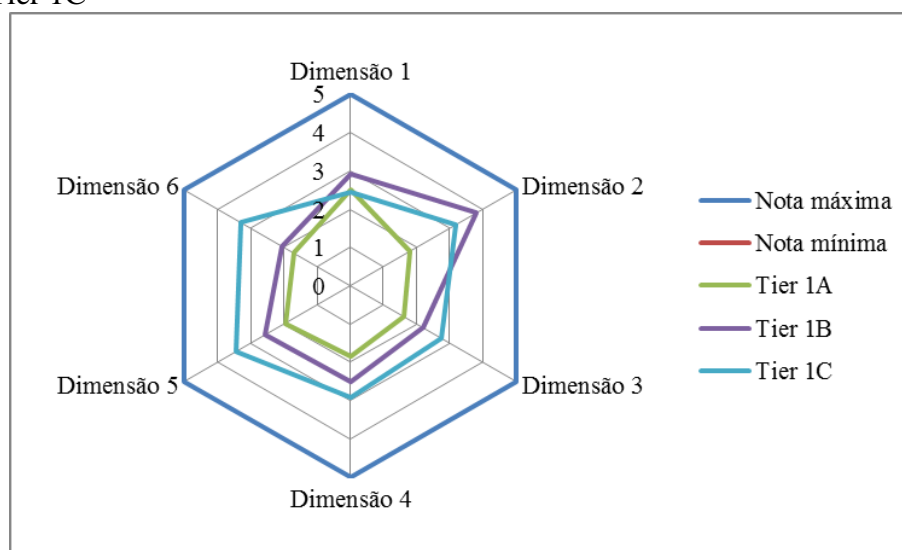
2 e 3, que obtiveram as maiores notas de variância e desvio padrão. Dessa forma, haverá uma maior coesão quanto às respostas disponibilizadas pelos respondentes do questionário sobre todas as seis dimensões.

Para a empresa fornecedora Tier 2C, não foi possível realizar a avaliação relacionada à variância e ao desvio padrão, visto que apenas um colaborador dessa empresa respondeu ao questionário.

4.4 Análise comparativa da maturidade das empresas Tier 1A, Tier 1B e Tier 1C

O gráfico de radar 04 demonstra os resultados da síntese das respostas dadas pelos participantes das empresas principais Tier 1A, Tier 1B e Tier 1C, comparando-as. Analisando-o, fica evidenciado que, para os respondentes da empresa Tier 1A, a dimensão 1, estratégia, estrutura e cultura organizacional, apresenta a maior representatividade, com nota 2,50. Para eles, a dimensão 3, fábricas inteligentes, possui a pior avaliação, com nota 1,63. Para os respondentes da empresa Tier 1B, a dimensão 2, força de trabalho, exibe a melhor representatividade, com nota 3,80. Na visão deles, a dimensão 6, tecnologia, demonstra a pior avaliação, com nota 2,05. Já para os respondentes da empresa Tier 1C, a dimensão 5, produtos e serviços inteligentes, apresenta a maior avaliação, com nota 3,44, e a dimensão 1, estratégia, estrutura e cultura organizacional, a pior avaliação de representatividade dentro dos conceitos 4.0, com nota 2,44.

Gráfico 4 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 1A, Tier 1B e Tier 1C



Fonte: Elaboração própria (2020)

Tabela 4 – Descrição do gráfico de radar 4

| Gráfico de radar 4 | Dimensão 1 | Dimensão 2 | Dimensão 3 | Dimensão 4 | Dimensão 5 | Dimensão 6 |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Nota máxima | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Nota mínima | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tier 1A | 2,50 | 1,80 | 1,63 | 1,86 | 1,96 | 1,71 |
| Tier 1B | 2,92 | 3,80 | 2,21 | 2,52 | 2,56 | 2,05 |
| Tier 1C | 2,44 | 3,20 | 2,75 | 2,93 | 3,44 | 3,29 |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Quadro 10 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 4

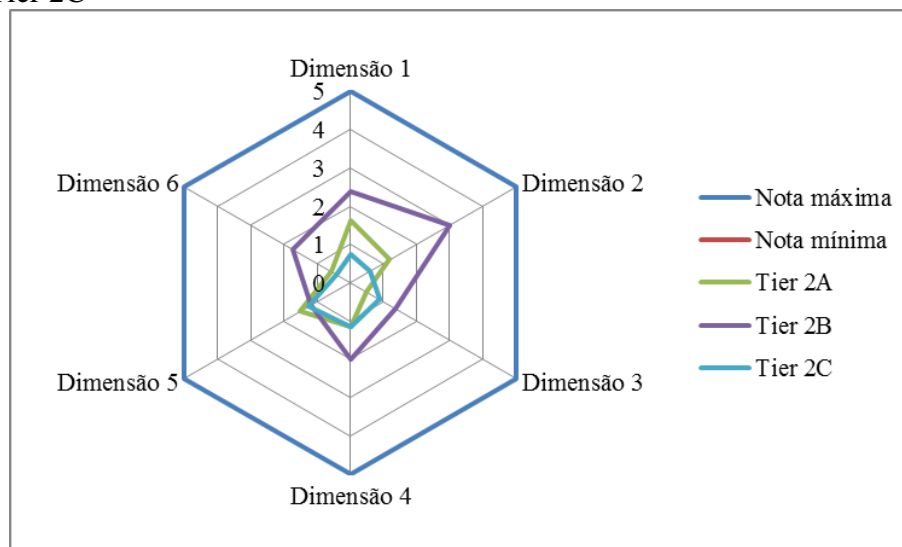
| | |
|------------|--|
| Dimensão 1 | Estratégia, estrutura e cultura organizacional |
| Dimensão 2 | Força de trabalho |
| Dimensão 3 | Fábricas inteligentes |
| Dimensão 4 | Processos inteligentes |
| Dimensão 5 | Produtos e serviços inteligentes |
| Dimensão 6 | Tecnologia |

Fonte: Elaboração própria (2020)

4.5 Análise comparativa da maturidade das empresas Tier 2A, Tier 2B e Tier 2C

O gráfico de radar 05 apresenta os resultados obtidos com os participantes das empresas fornecedoras Tier 2A, Tier 2B e Tier 2C. Analisando-o, fica evidenciado que para o respondente da empresa Tier 2A, a dimensão 1, estratégia, estrutura e cultura organizacional, apresenta a maior avaliação, com nota 1,63, enquanto a dimensão 3, fábricas inteligentes, possui a pior avaliação, com nota 0,50. Para o respondente da empresa Tier 2B, a dimensão 2, força de trabalho, exibe a melhor avaliação, com nota 3,00, enquanto a dimensão 5, produtos e serviços inteligentes, tem a pior avaliação, com nota 1,19. Por fim, para o respondente da empresa Tier 2C, a dimensão 4, processos inteligentes, tem a melhor avaliação, com nota 1,4, enquanto a dimensão 6, produtos e serviços inteligente, apresenta a pior avaliação de representatividade dentro dos conceitos 4.0, com nota 0,43.

Gráfico 5 – Resultados obtidos a partir das respostas dos participantes das empresas Tier 2A, Tier 2B e Tier 2C



Fonte: Elaboração própria (2020)

Tabela 5 – Descrição do gráfico de radar 5

| Gráfico de radar 5 | Dimensão 1 | Dimensão 2 | Dimensão 3 | Dimensão 4 | Dimensão 5 | Dimensão 6 |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Nota máxima | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Nota mínima | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tier 2A | 1,63 | 1,20 | 0,50 | 1,14 | 1,50 | 0,57 |
| Tier 2B | 2,38 | 3,00 | 1,38 | 2,00 | 1,19 | 1,71 |
| Tier 2C | 0,75 | 0,60 | 0,88 | 1,14 | 1,25 | 0,43 |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Quadro 11 – Dimensões analisadas no gráfico de radar 5

| | |
|------------|--|
| Dimensão 1 | Estratégia, estrutura e cultura organizacional |
| Dimensão 2 | Força de trabalho |
| Dimensão 3 | Fábricas inteligentes |
| Dimensão 4 | Processos inteligentes |
| Dimensão 5 | Produtos e serviços inteligentes |
| Dimensão 6 | Tecnologia |

Fonte: Elaboração própria (2020)

4.6 Avaliação dos resultados obtidos entre os grupos de Tiers 1 e 2

Para facilitar o entendimento sobre as avaliações obtidas neste estudo entre os Tiers participantes das cadeias de suprimentos acerca de nível de maturidade nos conceitos 4.0, apresenta-se a seguir quadro 12, que auxilia na identificação do grau de homogeneidade existente entre os membros de uma cadeia de suprimentos. Visando facilitar a leitura dos

dados, em destaque na cor verde está a dimensão com a maior nota e, na cor rosa, a dimensão com a menor nota.

Quadro 12 – Avaliação dos resultados obtidos com os grupos Tier 1 e Tier 2

| Dimensão | Resultados obtidos nos questionários (Tiers 1A, 1B e 1C) | | | Resultados obtidos nos questionários (Tiers 2A, 2B e 2C) | | |
|--------------|--|-------------|-------------|--|-------------|-------------|
| | Tier 1A | Tier 1B | Tier 1C | Tier 2A | Tier 2B | Tier 2C |
| | Avaliação | Avaliação | Avaliação | Avaliação | Avaliação | Avaliação |
| 1 | 2,50 | 2,92 | 2,44 | 1,63 | 2,38 | 0,75 |
| 2 | 1,80 | 3,80 | 3,20 | 1,20 | 3,00 | 0,60 |
| 3 | 1,63 | 2,21 | 2,75 | 0,50 | 1,40 | 0,88 |
| 4 | 1,86 | 2,52 | 2,93 | 1,14 | 2,00 | 1,14 |
| 5 | 1,96 | 2,56 | 3,44 | 1,50 | 1,19 | 1,25 |
| 6 | 1,71 | 2,05 | 3,29 | 0,57 | 1,71 | 0,43 |
| Média | 1,91 | 2,68 | 3,01 | 1,09 | 1,95 | 0,84 |

Fonte: Elaboração própria (2020)

De acordo com as informações apresentadas no quadro 12, é possível elaborar uma síntese dos resultados obtidos com a aplicação do questionário. Dentre todas as empresas participantes deste trabalho, a Tier 1C foi a que apresentou melhores resultados de pontuação entre as empresas principais, com praticamente todas as notas de avaliação acima de 2,50, e com uma média de notas de 3,01.

Sua melhor avaliação teve nota 3,44 na dimensão 5 — produtos e serviços inteligentes. Tal fato possivelmente está relacionado ao perfil da empresa que, segundo informações constantes em sua página no *site LinkedIn*, projeta e fabrica produtos eletrônicos inovadores para o *cockpit* e soluções de carros conectados para os principais fabricantes de veículos do mundo, apresentando também as seguintes especialidades: engenharia, operações

de teste, *design* e produção, áudio e *infotainment* (informação e entretenimento), informações e controles, e controladores de domínio.

Sua pior avaliação, no entanto, teve nota 2,44 na dimensão 1, estratégia, estrutura e cultura organizacional. Esse resultado demonstra a possibilidade de não haver uma política clara e objetiva da empresa na divulgação de suas estratégias corporativas, que podem ser desconhecidas pelos funcionários que responderam o questionário, tendo eles respondido com base apenas no que sabem de sua rotina de trabalho. Além disso, demonstra que ela não está se preparando em termos de estratégia, estrutura e cultura organizacional para suportar a implementação dos conceitos da Indústria 4.0.

Em contrapartida, seu principal fornecedor local, a empresa Tier 2C, apresentou as notas mais baixas de avaliação, quando comparada às demais empresas fornecedoras, com uma pontuação geral praticamente toda abaixo de 1,3. Sua melhor nota foi 1,25 na dimensão 5, e sua pior nota foi 0,43 na dimensão 6, tecnologia, sendo 0,84 a média das notas de avaliação. Esse resultado pode ser justificado por se tratar de uma empresa nacional de pequeno porte, com gestão do próprio dono, e que fornece componentes plásticos injetados não somente para o segmento de autopeças, o que pode caracterizar uma falta de foco e de comprometimento com relação à implementação dos conceitos da Indústria 4.0, visto que em outros nichos de mercado esses conceitos ainda não são conhecidos, tampouco exigidos pelos clientes.

No caso das empresas Tier 1B e Tier 2B, participantes da mesma cadeia de suprimentos, identifica-se um bom conjunto de resultados, com a empresa Tier 1B assumindo a segunda melhor média de avaliação entre as empresas principais, e seu fornecedor Tier 2B assumindo a melhor média de avaliação entre as empresas fornecedoras, quais sejam, 2,68 e 1,95 respectivamente. A melhor nota de avaliação da empresa Tier 1B foi 3,80 na dimensão 2, força de trabalho, enquanto sua pior nota, 2,05, se deu na dimensão 6. Essas pontuações demonstram haver grande empenho da organização no desenvolvimento e na capacitação de sua mão de obra, principalmente nos conceitos da Indústria 4.0, entretanto, seus funcionários entendem que a organização ainda deve aumentar seu foco na aquisição de tecnologia.

Já a melhor nota de avaliação da empresa Tier 2B, principal fornecedora na cadeia de suprimentos da empresa Tier 1B, foi 3,0 na dimensão 3, fábricas inteligentes. É possível atribuir essa nota elevada ao fato de a empresa Tier 2B ser fabricante de aços especiais, com processos contínuos de produção, utilizando autofornos grandes e poderosos, que necessitam de um forte esquema de digitalização e automação no controle dos parâmetros de seus

processos. Isso acaba gerando a necessidade de grande foco na manutenção e na estabilidade desses processos, por meio de conceitos de melhoria contínua, como os da Indústria 4.0.

Em contrapartida, a nota mais baixa de avaliação da empresa Tier 2B foi 1,19 na dimensão 5. Isso pode estar atrelado ao tipo de produto fabricado pela empresa, aços especiais, utilizando processos contínuos, e ao fato de que, mesmo sendo nacional, a empresa é caracterizada como sendo de grande porte, operando inclusive internacionalmente e sendo detentora de um monopólio nesse mercado de atuação.

Seguindo com as análises dos resultados obtidos, cabe ressaltar que as empresas Tier 1A e Tier 2A são participantes de uma mesma cadeia de suprimentos. É relevante, também, reforçar a informação de que se tratam de empresas multinacionais de origem alemã, o que remete a uma suposição de que apresentariam por esse motivo as melhores notas de avaliação. Ambas obtiveram suas melhores e piores notas de avaliação relacionadas às mesmas dimensões, quais sejam, 1 e 3, respectivamente.

Com relação à empresa Tier 1A, sua nota média de avaliação é 1,91. Sua melhor nota é 2,50 na dimensão 1, e sua pior nota é 1,63 na dimensão 3. Esses resultados demonstram haver um bom foco da organização em suas estratégias e a existência de uma boa estrutura e cultura organizacional para suportar a implementação dos conceitos da Indústria 4.0. No entanto, fica claro que embora possua uma estratégia instituída, a organização ainda não garantiu os investimentos necessários para transformar suas operações em fábricas inteligentes mediante os conceitos da Indústria 4.0.

A empresa Tier 2A, por sua vez, apresenta uma nota média de avaliação de 1,09. Sua melhor nota é 1,63 na dimensão 1, e sua pior nota é 0,50 na dimensão 3. Da mesma forma que seu par na cadeia de suprimentos (empresa Tier 1A), seu melhor resultado de avaliação remete ao fato de que a organização aparentemente demonstra ter foco em suas estratégias e desenvolve sua estrutura e cultura organizacional, direcionando-as à implementação dos conceitos da Indústria 4.0. Sua pior nota de avaliação, no entanto, demonstra não haver um planejamento a curto e médio prazo para a liberação dos investimentos necessários para suportar a implementação de tais conceitos.

4.7 Identificação do grau de homogeneidade dos membros das cadeias de suprimentos avaliadas

Levando em consideração o grau de homogeneidade existente entre os membros de uma mesma cadeia de suprimentos, o quadro a seguir apresenta o grau de desbalanceamento

entre as empresas participantes desta pesquisa. Com relação ao par Tier 1A e Tier 2A, o grau de desbalanceamento é de 75% para mais, considerando-se o Tier 1A em relação ao Tier 2A em comparação a suas notas médias de avaliação.

Observa-se que mesmo se tratando de duas empresas multinacionais de origem alemã, há diferenças entre elas. Como o surgimento dos conceitos da Indústria 4.0 se deu na Alemanha em 2011, levanta-se a hipótese de que empresas dessa nacionalidade teriam graus elevados em relação às características da Indústria 4.0. Os dados apresentados, no entanto, indicam que as empresas participantes desta pesquisa estão ainda buscando atingir patamares mais elevados no que se refere à Indústria 4.0.

Já em relação às empresas Tier 1B e Tier 2B, o quadro 13 mostra o menor grau de desbalanceamento entre as empresas, 37%, para mais, considerando-se o Tier 1B em relação ao Tier 2B em comparação às suas notas médias de avaliação. Ressalta-se que a empresa Tier 1B é uma multinacional de grande porte, e que a empresa Tier 2B é nacional, porém, também de grande porte, com atuação global e administrada de forma profissionalizada.

Por fim, quanto às empresas Tier 1C e Tier 2C, o quadro 13 apresenta um grau de desbalanceamento alarmante, 258% para mais, considerando-se o Tier 1C em relação ao Tier 2C em comparação às suas notas médias de avaliação. Cabe destacar que a empresa Tier 1C é uma multinacional de grande porte, enquanto a empresa Tier 2C é nacional, de pequeno porte e administrada diretamente pelo dono.

Quadro 13 – Desbalanceamento identificado entre as empresas Tier 1A, 2A, 1B, 2B, 1C e 2C

| Parcerias | Médias | % sobre as médias |
|------------------|---------------|--------------------------|
| Tier 1A | 1,91 | 75% |
| Tier 2A | 1,09 | |
| Tier 1B | 2,68 | 37% |
| Tier 2B | 1,95 | |
| Tier 1C | 3,01 | 258% |
| Tier 2C | 0,84 | |

Fonte: Elaboração própria (2020)

4.8 Identificação de possíveis desbalanceamentos e suas prováveis causas

Com relação às empresas Tier 1A e Tier 2A, o grau de desbalanceamento pode estar atrelado a duas situações. A primeira delas está relacionada ao fato de a empresa Tier 2A fabricar produtos para outros segmentos de mercado além do de autopeças; a segunda refere-se ao fato de essa empresa não ser fornecedora direta de nenhuma montadora de veículos (OEM – *original*

equipment manufacturer). Tais situações são fatores relevantes para o baixo nível de maturidade apresentado pela empresa Tier 2A nos conceitos da Indústria 4.0, e possivelmente limitam suas ações estratégicas, no sentido de liberação de recursos e investimentos para o processo de transformação.

Quanto às empresas Tier 1B e Tier 2B, identifica-se que o grau de desbalanceamento pode estar atrelado a três questões. A primeira delas está relacionada ao fato de a empresa Tier 2B também fabricar produtos direcionados a outros segmentos de mercado além do de autopeças, pois sabe-se que nesses outros segmentos os produtos podem apresentar menor nível de exigências técnicas. A segunda questão refere-se ao fato de a empresa Tier 2B não ser fornecedora direta de nenhuma montadora de veículos, eximindo-se, assim, do compromisso de implementação dos conceitos da indústria 4.0. Por fim, a terceira questão está relacionada ao fato de que por se tratar de empresa nacional de grande porte, assume-se a premissa de não haver uma incompatibilidade entre seus resultados financeiros e a quantidade de investimentos necessários para se adequar aos conceitos da Indústria 4.0, no entanto, existe a possibilidade de a empresa Tier 2B ser detentora do monopólio em seu segmento de atuação e de sua estratégia corporativa não ser direcionada à disponibilização de recursos e investimentos relacionados à implementação dos conceitos da Indústria 4.0.

No que concerne às empresas Tier 1C e Tier 2C, observa-se que o grau de desbalanceamento pode estar atrelado a três circunstâncias. A primeira delas está relacionada ao fato de a empresa Tier 2C também fabricar produtos direcionados a outros segmentos de mercado além do de autopeças, não havendo a exigência dos outros clientes para se adequar aos conceitos da Indústria 4.0. A segunda circunstância decorre do fato de a empresa Tier 2C não ser fornecedora direta de nenhuma montadora de veículos. Finalmente, a terceira circunstância reside no fato de que a Tier 2C é uma empresa nacional de pequeno porte, assumindo-se, assim, a premissa de haver uma incompatibilidade considerável entre seus resultados financeiros e a quantidade de investimentos necessários para se adequar aos conceitos da Indústria 4.0.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Síntese dos resultados

Para apresentar a síntese dos resultados obtidos por meio da aplicação do questionário e da análise das respostas, foram elaborados os quadros 14, 15 e 16, mostrados a seguir, que

apresentam as diferenças existentes entre os membros de uma mesma cadeia de suprimentos quanto às respostas dos questionários *versus* seus níveis de maturidade e seu *status* de implementação dos conceitos da Indústria 4.0 para cada dimensão do modelo. Para elaborar os quadros, foi observada a quantidade de respostas dadas por nível, sem se ater às dimensões, buscando verificar o nível de maturidade geral e não por dimensão das empresas. Assim, foi possível relacionar o nível ao *status* de maturidade (DE CAROLIS *et al.*, 2017).

Por meio da análise do quadro 14, a seguir, observa-se que a empresa Tier 1A possui maior representatividade nos níveis 1 (*status* inicial) e 2 (*status* de alerta) com 45,5% e 28,8%, respectivamente. O nível 3 (*status* aceitável) possui 9,1% de representatividade nas respostas obtidas e os níveis 4 (*status* ótimo) e 5 (*status* ideal) apresentam apenas 13,6% e 3%, respectivamente.

O fornecedor Tier 2A, por sua vez, obteve a maior representatividade no nível 1, com 34,8% das respostas, seguida do nível 0 (*status* crítico) com 33%. Observa-se, também, que o nível 2 apresentou 12,1% das respostas. Nessa análise percebe-se, ainda, haver uma maior representatividade das respostas relacionadas ao nível 3, com 16,7%. Em contrapartida, há uma representatividade baixa nos níveis 4 e 5, com respectivamente com 3,0% e 0% das respostas obtidas.

Quadro 14 – Consolidação das avaliações do questionário das empresas Tier 1A e Tier 2A

| Dimensões 1 a 6 – Tier 1A – <i>RANKING NÍVEIS MATURIDADE</i> | | | | Dimensões 1 a 6 – Tier 2A – <i>RANKING NÍVEIS MATURIDADE</i> | | | |
|---|--------------------------|----------------------|--|---|--------------------------|----------------------|--|
| Escala Likert Nível | Quantidade de avaliações | % sobre as perguntas | Estágios de avaliação – De Carolis <i>et al.</i> (2017) | Escala Likert Nível | Quantidade de avaliações | % sobre as perguntas | Estágios de avaliação – De Carolis <i>et al.</i> (2017) |
| Nível 0 | 0 | 0% | Status crítico | Nível 0 | 22 | 33% | Status crítico |
| Nível 1 | 30 | 45,5% | Status inicial | Nível 1 | 23 | 34,8% | Status de inicial |
| Nível 2 | 19 | 28,8% | Status de alerta | Nível 2 | 8 | 12,1% | Status de alerta |
| Nível 3 | 6 | 9,1% | Status aceitável | Nível 3 | 11 | 16,7% | Status aceitável |
| Nível 4 | 9 | 13,6% | Status ótimo | Nível 4 | 2 | 3,0% | Status ótimo |
| Nível 5 | 2 | 3,0% | Status ideal | Nível 5 | 0 | 0% | Status ideal |
| Total | 66 | 100% | | Total | 66 | 100% | |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Prosseguindo a análise, o quadro 15, a seguir, apresenta as diferenças existentes entre as empresas Tier 1B e Tier 2B, membros de uma mesma cadeia de suprimentos, quanto às respostas dos questionários *versus* seus níveis de maturidade e o seu *status* de implementação dos conceitos da Indústria 4.0 para cada dimensão do modelo.

Quadro 15 – Consolidação das avaliações do questionário das empresas Tier 1B e Tier 2B

| Dimensões 1 a 6 – Tier 1B – RANKING NÍVEIS MATURIDADE | | | | Dimensões 1 a 6 – Tier 2B – RANKING NÍVEIS MATURIDADE | | | |
|--|-----------------------------|-------------------------|---|--|-----------------------------|-------------------------|--|
| Escala Likert Nível | Quantidade de avaliações | % sobre as perguntas | Estágios de avaliação – De Carolis <i>et al.</i> (2017) | Escala Likert Nível | Quantidade de avaliações | % sobre as perguntas | Estágios de avaliação – De Carolis <i>et al.</i> (2017) |
| Nível 0 | 1 | 2% | Status crítico | Nível 0 | 18 | 27% | Status crítico |
| Nível 1 | 8 | 12,1% | Status inicial | Nível 1 | 7 | 10,6% | Status de inicial |
| Nível 2 | 21 | 31,8% | Status de alerta | Nível 2 | 21 | 31,8% | Status de alerta |
| Nível 3 | 20 | 30,3% | Status aceitável | Nível 3 | 15 | 22,7% | Status aceitável |
| Nível 4 | 16 | 24,2% | Status ótimo | Nível 4 | 5 | 7,6% | Status ótimo |
| Nível 5 | 0 | 0% | Status ideal | Nível 5 | 0 | 0% | Status ideal |
| Total | 66 | 100% | | Total | 66 | 100% | |

Fonte: Elaboração própria (2020)

Por meio da análise do quadro 15, observa-se que a empresa Tier 1B possui maior representatividade nos níveis 2 (*status* de alerta) e 3 (*status* aceitável), com 31,8% e 30,3% das respostas obtidas, respectivamente. Observa-se, também, o nível 4 (*status* ótimo), com 24,2% das respostas, e o nível 1 (*status* inicial), com 12,1%. Nota-se, ainda, que 0% das respostas foram direcionadas ao nível 5 (*status* ideal), enquanto 2,0% foram voltadas ao nível 0 (*status* crítico).

O fornecedor Tier 2B obteve a maior representatividade nos níveis 2 e 3, com respectivamente 31,8% e 22,7% das respostas obtidas. Os níveis 0 e 1 apresentaram, respectivamente, 27,0% e 10,6% das respostas, enquanto os níveis 4 e 5 representaram 7,6% e 0% das respostas, respectivamente.

Finalizando a análise, o quadro 16, a seguir, apresenta as diferenças existentes entre as empresas Tier 1C e Tier 2C, membros de uma mesma cadeia de suprimentos, quanto às

respostas dos questionários *versus* seus níveis de maturidade e o seu *status* de implementação dos conceitos da Indústria 4.0 para cada dimensão do modelo.

Observa-se que a empresa Tier 1C possui maior representatividade no nível 3 (*status* aceitável), com 54,5% das respostas obtidas, acompanhado dos níveis 2 (*status* de alerta) e 4 (*status* ótimo) com 24,2% e 21,2%, respectivamente. Observam-se também os níveis 0 (*status* crítico), 1 (*status* inicial) e 5 (*status* ideal), todos com 0%.

O fornecedor Tier 2C obteve a maior representatividade no nível 0, com 44,0% das respostas obtidas. Observa-se uma proximidade entre os níveis 1 e 2, com respectivamente 24,2% e 27,3% das respostas obtidas. O nível 3 (*status* aceitável) teve apenas 4,5% das respostas, enquanto os níveis 4 e 5 apresentaram 0%.

Quadro 16 – Consolidação das avaliações do questionário das empresas Tier 1C e Tier 2C

| Dimensões 1 a 6 – Tier 1C – RANKING NÍVEIS MATURIDADE | | | | Dimensões 1 a 6 – Tier 2C – RANKING NÍVEIS MATURIDADE | | | |
|--|--------------------------|----------------------|---|--|--------------------------|----------------------|---|
| Escala Likert Nível | Quantidade de avaliações | % sobre as perguntas | Estágios de avaliação – De Carolis <i>et al.</i> (2017) | Escala Likert Nível | Quantidade de avaliações | % sobre as perguntas | Estágios de avaliação – De Carolis <i>et al.</i> (2017) |
| Nível 0 | 0 | 0% | Status crítico | Nível 0 | 29 | 44% | Status crítico |
| Nível 1 | 0 | 0,0% | Status inicial | Nível 1 | 16 | 24,2% | Status de inicial |
| Nível 2 | 16 | 24,2% | Status de alerta | Nível 2 | 18 | 27,3% | Status de alerta |
| Nível 3 | 36 | 54,5% | Status aceitável | Nível 3 | 3 | 4,5% | Status aceitável |
| Nível 4 | 14 | 21,2% | Status ótimo | Nível 4 | 0 | 0,0% | Status ótimo |
| Nível 5 | 0 | 0% | Status ideal | Nível 5 | 0 | 0% | Status ideal |
| Total | 66 | 100% | | Total | 66 | 100% | |

Fonte: Elaboração própria (2020)

A partir dos resultados obtidos com as respostas dos questionários e das informações apresentadas nos quadros 14, 15 e 16, foi elaborado o quadro 17, que apresenta um conjunto

de sugestões de ações de melhoria relacionadas à evolução dos níveis de implementação e a todos estágios de maturidade das empresas respondentes participantes deste trabalho. Por serem apenas sugestões, com base no modelo proposto, nos modelos analisados previamente e nas práticas de gestão em uso nas organizações, cada empresa participante, de acordo com sua realidade e seu plano estratégico, poderá colocar ou não em prática essas ações.

As ações sugeridas não foram atreladas às dimensões do modelo proposto, mas sim ao *status* de implementação e ao estágio de maturidade identificados e relacionados aos conceitos da Indústria 4.0 que caracterizam cada empresa atualmente.

Quadro 17 – Ações relacionadas a melhoria dos níveis de implementação e aos estágios de maturidade das empresas participantes

| DIMENSÕES | MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE LIKERT ADAPTADO | METODOLOGIA DE De CAROLIS <i>et al.</i> (2017) ADAPTADA | PLANOS DE AÇÕES PARA MELHORIA DOS ESTÁGIOS DE MATURIDADE | | |
|--|---|---|--|--|------------------------|
| | Escala de avaliação utilizada no questionário | Evolução das Dimensões | Evolução dos estágios de maturidade | Ações sugeridas | Responsáveis sugeridos |
| – Estratégia, estrutura e cultura organizacional – Força de trabalho – Fábricas inteligentes – Processos inteligentes – Produtos e serviços inteligentes – Tecnologia | Nível 0 – Baixo ou nenhum grau de implementação | Nível 0 <i>Status</i> crítico | Estágio 0 Planejamento | Definir ou reformular a estratégia de implementação | Alta administração |
| | Nível 1 – Ações-piloto planejadas ou em desenvolvimento | Nível 1 <i>Status</i> inicial | Estágio 1 Iniciação | Realizar reunião de <i>kick off</i> com o time envolvido | Gerente do projeto |
| | Nível 2 – Implementação iniciada, com alguns benefícios observados | Nível 2 <i>Status</i> de alerta | Estágio 2 Gerenciamento | Monitorar periodicamente a execução das ações planejadas | Líderes do projeto |
| | Nível 3 – Implementação intermediária, que melhorou a competitividade da empresa | Nível 3 <i>Status</i> aceitável | Estágio 3 Definição | Monitorar os resultados obtidos, por meio de indicadores de <i>performance</i> | Líderes do projeto |
| | Nível 4 – Implementação avançada, com retornos econômicos claros | Nível 4 <i>Status</i> ótimo | Estágio 4 Gerenciamento quantitativo | Monitorar os resultados obtidos, por meio de indicadores financeiros | Gerente do projeto |
| | Nível 5 – Referência na aplicação dos conceitos e na implementação das tecnologias da Indústria 4.0 | Nível 5 <i>Status</i> ideal | Estágio 5 Otimização | Garantir a manutenção do projeto e a melhoria contínua dos indicadores | Alta administração |

Fonte: Elaboração própria (2020)

5.2 Conclusões finais

A indústria 4.0 ainda é um tema em evolução na literatura e em aplicações industriais. Assim sendo, o número de publicações científicas ainda é baixo em comparação a outros temas maduros, tanto da engenharia como da manufatura. Os conceitos e as tecnologias abordados nesse contexto são de grande relevância para as indústrias de transformação e, a médio e longo prazo, podem alterar significativamente o nível de concorrência entre empresas e até mesmo em cadeias de valor inteiras. Portanto, é importante que as empresas estejam preparadas para grandes mudanças e transformações nos ambientes de negócios e que tenham disponíveis ferramentas práticas e robustas para avaliar a maturidade na implementação dos conceitos e das tecnologias relacionados ao contexto da Indústria 4.0.

A revisão da literatura mostra que a implementação da Indústria 4.0 em empresas de manufatura requer uma visão ampla e aprofundada, não focada exclusivamente em melhorias de sistemas, como *softwares* e *hardwares* no ambiente fabril, trazendo, também, uma nova orientação estratégica aos negócios, gerando o desenvolvimento de competências da força de trabalho, adaptando os atuais modelos de negócios, desenvolvendo novos produtos e serviços para as novas demandas voláteis e suas funcionalidades, e implementando tecnologias transformadoras e disruptivas que facilitem o processo de introdução da Indústria 4.0 nas empresas.

Ainda em relação à revisão da literatura, observa-se haver uma convergência das principais tecnologias facilitadoras da Indústria 4.0 consolidadas nas últimas décadas e que suportam as novas demandas industriais emergentes. Dentre elas, estão os sistemas ciberfísicos, a Internet das Coisas, a computação em nuvem, o *Big-Data* e o *Big-Data Analysis*, a arquitetura orientada a serviços, os sistemas inteligentes e autônomos, a fabricação aditiva (por meio da impressão 3D), os dispositivos móveis e seus múltiplos aplicativos.

Nesse contexto, o presente trabalho preenche uma lacuna de pesquisa existente ao fornecer um modelo de maturidade metodologicamente rigoroso e fundamentado teoricamente para empresas de manufatura focado nos processos de *Supply Chain* e que auxilia na identificação dos graus de homogeneidade existentes entre os membros das cadeias de suprimentos. Dessa forma, o valor do modelo apresentado se concentra na combinação entre rigor científico, relevância prática e sua aplicabilidade direta.

Röglinger *et al.* (2012) afirmam que processos de transformação carecem de suporte e devem ser estruturados por meio de instrumentos prontos para uso e adaptáveis para avaliação e melhoria dos níveis de maturidade.

Em paralelo a essa grande evolução tecnológica, vários conceitos relacionados à Quarta Revolução Industrial também evoluíram. Dentre eles, é possível citar a demanda customizada dos clientes, a digitalização de processos de negócios, incluindo o desenvolvimento de produtos e serviços digitais, a manufatura integrada, a conectividade entre máquinas e outros sistemas de gestão e a consequente descentralização de decisões, que passam a ser realizadas por sistemas inteligentes e autônomos. Outros conceitos importantes são as crescentes capacidades analíticas de dados em tempo real, a digitalização do produto suportada por sistemas embarcados inteligentes por meio de tecnologias de conectividade e a utilização de *layouts* ágeis e reconfiguráveis. No centro de todos esses conceitos e de todas essas tecnologias emergentes, estão os dados, cada vez mais precisos e adquiridos em tempo real, permitindo mais decisões baseadas em informações, e não nas experiências ou nos sentimentos das pessoas.

O'Donovan, Bruton e O'Sullivan (2016) afirmam que existem vários desafios associados ao desenvolvimento das capacidades analíticas industriais, tais como a gestão de tecnologias e plataformas heterogêneas, a formação de equipes multidisciplinares, os treinamentos, entre outros.

Alguns desafios são amplificados pelo fato de não haver métodos disponíveis para medir o nível atual de capacidade das empresas e também para identificar estrategicamente as áreas que precisam de melhorias. O foco deste trabalho foi direcionado ao desenvolvimento de uma ferramenta a ser usada na quantificação da maturidade das empresas, possibilitando também a mensuração do grau de homogeneidade dos membros de uma cadeia de suprimentos e a identificação das possíveis causas dos desbalanceamentos.

Este trabalho aplicado e seu modelo proposto tiveram como objetivo colaborar com o meio empresarial para a compreensão e a implementação dos principais conceitos da Indústria 4.0 e de suas tecnologias relacionadas, tendo contribuído, dessa forma, também com o meio acadêmico, ao trazer um melhor entendimento desse fenômeno. O modelo proposto foi adaptado a partir de dois modelos de maturidade existentes; com base neles, foi elaborado um questionário aplicado em três empresas multinacionais e com operações fabris na região da Grande São Paulo (SP), todas relacionadas ao mercado automotivo, e em pelo menos um de seus fornecedores relevantes pertencentes a suas cadeias de suprimentos.

Embora a validação do questionário tenha sido feita apenas com os profissionais especialistas em conceitos de melhoria contínua dessas empresas, o modelo demonstra conter todas as facetas da implementação dos conceitos da Indústria 4.0 e está pronto para ser utilizado no formato de autoadministração e para prosseguir com o estágio de divulgação

científica. Essa etapa é relevante, pois possibilitará análises comparativas da maturidade entre empresas de diferentes segmentos de mercado.

O modelo de maturidade proposto neste trabalho é composto por recursos técnicos e especificamente relacionados a produtos e serviços, fábricas e processos, recursos de gestão relacionados à estratégia e cultura organizacional, qualificação da força de trabalho e tudo isso, através da utilização de tecnologias facilitadoras e transformadoras. Ele atende a exigência de uma abordagem mais ampla e aprofundada, pois inclui as boas práticas anteriormente mencionadas, e respalda as respostas das questões de pesquisa deste trabalho, que foram: a. As empresas que compõem uma cadeia de suprimentos apresentam diferentes níveis de maturidade no contexto da Indústria 4.0?; b. É possível afirmar que há uma homogeneidade entre os participantes de uma cadeia em relação a esse conceito?; c. Por quê?.

Como resultado prático, conforme mostrado na seção 5.1 deste trabalho, este modelo proporcionou às empresas participantes deste projeto a identificação de seus níveis de maturidade relacionados aos conceitos da Indústria 4.0, mediante a aplicação do questionário e a compilação dos dados obtidos, respondendo, assim, a questão de pesquisa “a”. Além disso, os dados obtidos trouxeram à tona informações relevantes que possibilitaram às empresas participantes a identificação de seus graus de homogeneidade dentro de suas respectivas cadeias de suprimentos relacionados aos níveis de maturidade observados, respondendo, desse modo, a questão de pesquisa “b”. Posteriormente, com essas informações em mãos, tornou-se possível a elaboração de hipóteses que sustentam as possíveis causas dos desbalanceamentos observados para cada par de participantes do projeto, possibilitando, assim, a elaboração de sugestões para eliminá-los ou reduzi-los, e respondendo, por fim, a questão de pesquisa “c”.

5.3 Limitações

O modelo de maturidade apresentado foi projetado para auxiliar as empresas a avaliar suas estratégias de implementação dos conceitos da Indústria 4.0 e para que os pesquisadores pudessem entender melhor esse fenômeno. Neste trabalho, a implementação dos conceitos da Indústria 4.0 foi trabalhada de diversas maneiras: foram descritas suas dimensões; foram identificados os níveis de maturidade de cada uma delas; e foi proposto um questionário para classificar as empresas quanto ao seu grau de homogeneidade nas cadeias de suprimentos a que pertencem. Essas partes juntas constituem uma ferramenta completa para uma avaliação

de maturidade e para a identificação grau de homogeneidade entre participantes de uma mesma cadeia de suprimentos.

Todavia, é válido considerar que a principal limitação desta pesquisa é o pequeno número de profissionais do setor de autopeças que responderam o questionário. No futuro, será interessante disseminá-lo, física ou virtualmente, e aprimorar sua validação estatística, o que é essencial para sua utilização para fins de pesquisa e empresariais.

Conforme Albliwi *et al.* (2014), os modelos de maturidade geralmente têm sido alvo de críticas que afirmam que eles simplificam demais a realidade e que a hipótese de estágio fundamental carece de base empírica (BENBASAT *et al.*, 1984). No entanto, vários estudos de caso mostram os benefícios dos modelos de maturidade (ISOHERRANEN; KARKKAINEN; KESS, 2015) aplicados com sucesso nas práticas comerciais. Tais modelos representam uma ferramenta popular para o desenvolvimento da excelência operacional e para fortalecer a competitividade corporativa e das cadeias de suprimentos.

Apesar de o processo de desenvolvimento deste trabalho aplicado ter sido apoiado por publicações anteriores e por trabalhos empíricos, é necessário considerar que as opiniões e os julgamentos de especialistas contêm certo grau de subjetividade. Os participantes desta pesquisa foram especialistas de quatro empresas industriais multinacionais de médio e grande porte e de duas empresas industriais nacionais, sendo uma delas profissionalizada (com um conselho administrativo profissional) e de grande porte, e outra não profissionalizada (com gestão do proprietário) e de pequeno porte. Essas características podem impor um potencial viés relacionado ao porte destas indústrias, por isso, novas pesquisas podem considerar outras perspectivas, como apenas empresas de pequeno porte, apenas empresas de médio porte, apenas empresas de grande porte, ou ainda apenas empresas multinacionais ou nacionais.

Outra limitação deste trabalho está relacionada ao nível de entendimento dos respondentes do questionário quanto aos conceitos da Indústria 4.0 e ao estágio de implementação em que se encontram as empresas onde trabalham. Isso pode ser observado no resultado exposto nas tabelas 1, 2 e 3, que apresentam a variância e o desvio padrão identificados nas empresas principais participantes (Tiers 1A, 1B e 1C). Tal verificação foi possível, pois houve pelo menos três respondentes por empresa principal. Nesse sentido, cabe salientar que não foi possível identificar a variância e o desvio padrão das respostas obtidas pelos questionários das empresas fornecedoras (Tiers 2A, 2B e 2C), pois nelas houve apenas um respondente, conforme especificado na seção 3.4.3 deste trabalho.

Embora possam ter atingido um certo grau de maturidade, os conceitos da Indústria 4.0 ainda estão em evolução, de modo que serão necessárias avaliações críticas para

determinar se o estágio de maior maturidade continuará a refletir o *status* tecnológico em vigor. Ademais, com o surgimento de novos aspectos da digitalização, o modelo deverá ser revisado, de acordo com a sexta etapa da metodologia de desenvolvimento de modelos de maturidade definida por De Bruin *et al.* (2005).

Tarhan, Turetken e Reijers. (2016) destacam que a atenção da pesquisa tem sido voltada ao desenvolvimento e à liberação de modelos, enquanto os trabalhos empíricos sobre sua validação são poucos e distantes entre si. Atualmente, os pesquisadores têm trabalhado no fornecimento de estudos de caso que demonstrem a aplicabilidade do modelo. Por isso, como sempre são necessárias verificações empíricas, pesquisas futuras devem ter como objetivo exemplificar ainda mais a generalização do modelo proposto neste trabalho.

Apesar das limitações expostas, este trabalho é adequado para fornecer informações estruturais sobre o nível de maturidade e o grau de homogeneidade existentes entre membros de uma mesma cadeia de suprimentos, buscando preencher possíveis lacunas existentes no robustecimento de parcerias estratégicas entre eles, gerando assim um maior foco na agregação de valor aos negócios e ao SCM.

5.4 Contribuições do trabalho para as práticas gerenciais

Este trabalho se propôs a contribuir com os cenários acadêmico, econômico e social. Nesse sentido, ao seu término, foram observadas as possíveis contribuições apresentadas a seguir.

Na área acadêmica, por meio da revisão de literatura quanto aos modelos de maturidade existentes, foram mapeados as características e os componentes relevantes da Indústria 4.0. Nesse sentido foram identificadas informações relevantes sobre os investimentos e os aportes praticados pelos países mais evoluídos nesse contexto. Outro fator de contribuição para a área acadêmica se refere à possível utilização do modelo proposto por outros pesquisadores, tanto para mapear seus estágios de maturidade no contexto da Indústria 4.0 como para identificar o grau de homogeneidade existente entre os participantes dessas cadeias, possibilitando também a identificação de suas possíveis causas. Ademais, pelo fato de os conceitos da Indústria 4.0 ainda não serem esgotados, este trabalho auxiliou no avanço do entendimento sobre eles.

Quanto ao setor econômico, este trabalho aplicado possibilita uma maior visibilidade das empresas no contexto da Indústria 4.0, incentivando o desenvolvimento de seus conceitos de forma mais ampla. Ao conhecer melhor a evolução dos níveis de maturidade apresentados

no modelo proposto, podem ser proporcionadas melhorias de *performance* nas empresas, como maior flexibilidade, melhor produtividade, excelência em qualidade de produtos, processos e serviços, redução de custos e de tempo de reação e de resposta a novas demandas, ganhos financeiros e outras melhorias consideradas no contexto da Indústria 4.0.

Nesse cerne, o questionário proposto neste trabalho é uma contribuição relevante, pois pode ser usado pelas empresas para mapear seus estágios de maturidade no contexto 4.0 e para identificar o grau de homogeneidade existente entre os participantes das cadeias de suprimentos, possibilitando também a identificação de suas possíveis necessidades de investimentos na aquisição ou no desenvolvimento de novas tecnologias.

Além disso, este trabalho traz a possibilidade de agregação de valor nas empresas, tanto em suas operações como em seus negócios, por meio da identificação e do entendimento do grau de homogeneidade existente entre os membros de suas cadeias de suprimentos, pois isso pode gerar planos de ação robustos e consistentes relacionados a melhorias cabíveis nos relacionamentos entre clientes e fornecedores, buscando incrementar seus níveis de parceria nos negócios.

Por fim, quanto ao cenário social, este trabalho apresentou também uma melhor forma de elucidação para a sociedade sobre os conceitos da Indústria 4.0, trazendo à tona suas características e seus componentes essenciais. Além disso, esta pesquisa apresentou as melhorias que o contexto 4.0 trará para a sociedade como consumidora dessa nova forma de produção, bem como os desafios que foram introduzidos para os trabalhadores, abrindo a discussão sobre o novo perfil de profissionais que deve ser procurado pelas empresas, posto que estas também se tornam responsáveis pelo treinamento e desenvolvimento das competências de seus colaboradores dentro dos conceitos e das necessidades da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

- ALBLIWI, Saja Ahmed; ANTONY, Jiju; ARSHED, Norin. Critical literature review on maturity models for business process excellence. *In: International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2014*. Selangor, p. 79-83, 2014.
- ABRAMOWICZ, Witold; AUER, Sören; HEATH, Tom. *Linked Data in Business*. 2016.
- ASDECKER, Björn; FELCH, Vanessa. Development of an industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains. **Journal of Modelling in Management**, v.13, n. 4, p. 840-883, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/JM2-03-2018-0042>. Acesso em: 24 mai 2020.
- ASTARLOA, Armando *et al.* Intelligent gateway for Industry 4.0. Compliant production. *In: IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, p. 4902-4907, 2016.
- AZUMA, Ronald T. A survey of augmented reality. **Presence: Teleoperators & Virtual Environments**, v. 6, n. 4, p. 355-385, 1997.
- BANGEMANN, Thomas *et al.* Integration of classical components into industrial *Cyber-Physical Systems*. **Proceedings of the Ieee**, v. 104, n. 5, p. 947-959, 2016.
- BASSETO, Ana Laura Canassa. **Modelo de maturidade para a análise das indústrias no contexto da Indústria 4.0**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2019.
- BASL, Josef. Pilot study of readiness of czech companies to implement the principles of Industry 4.0. *Management and Production Engineering Review*, v. 8, n. 2, p. 3- 8, 2017.
- BAUER, Elisabeth *et al.* Towards a security baseline for IaaS-cloud back-ends in Industry 4.0. *In: 12th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*. Anais [...]. Cambridge, p. 427-432, 2018.
- BAYGIN, Mehmet *et al.* An Effect Analysis of Industry 4.0 to Higher Education. *In: 15th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training*, p. 1-4, 2016.
- BECKER, Jörg.; KNACKSTEDT, Ralf; POPPELBUB, Jens. Developing Maturity Models for IT Management: A Procedure Model and its Application. **Business & Information Systems Engineering**, v. 1, n. 3, p. 213-22, 1995.
- BENBASAT, Izak. *An analysis of research methodologies*. **The information systems research challenge**, v. 47, p. 85, 1984.
- BERMUDES, Wanderson *et al.* Tipos de escalas utilizadas em pesquisas e suas aplicações. **Vértices**. Campos dos Goytacazes: [s. n.], v. 18, n. 2, p. 7-20, 2016.

BHARADWAJ, Anandhi S. A resource-based perspective on information technology capability and firm performance: an empirical investigation. **MIS Quarterly**, v. 24 n. 1, p. 169-196, 2000.

BRYNJOLFSSON, Erik; HITT, Lorin M. Beyond computation: information technology, organizational transformation and business performance. **The Journal of Economic Perspectives**, v. 14 n. 4, p. 23-48, 2000.

BURDEA, Grigore C.; COIFFET, Philippe. Virtual reality technology. **John Wiley & Sons**, 2 ed., 2003.

CASTRO, Felipe González *et al.* A methodology for conducting integrative mixed methods research and data analyses. **Journal of Mixed Methods Research**, v. 4, n. 4, p. 342-360, 2010.

CHEN, Bor-Sen; TSENG, Chung Shi; UANG, Huey-Jian. Robustness design of nonlinear dynamic systems via fuzzy linear control. **IEEE Transactions on fuzzy systems**, v. 7, n. 5, p. 571-585, 1999.

CHIANG, Leo; LU, Bo; CASTILLO, Ivan. Big-Data analytics in chemical engineering. **Annual review of chemical and biomolecular engineering**, v. 8, p. 63-85, 2017.

CHRISTOPHER, Martin. **Logistics & Supply Chain Management**. Prentice Hall: 2 ed., 1998.

CHU, S.Y., FANG, W.C. Exploring the relationships of Trust and Commitment in Supply Chain Management. **The Journal of American Academy of Business**, Cambridge, v. 9, n. 1, 2006.

CONTI, Marco; PASSARELLA, Andrea; DAS, Sajal K. The Internet of People (IoP): A new wave in pervasive mobile computing. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 41, p. 1-27, 2017.

COSTA, José Manuel. **Sociedade 5.0, o futuro, pelo presente**. 2018. Disponível em: <https://www.dinheirovivo.pt/opiniao/sociedade-5-0-o-futuro-pelo-presente/>. Acesso em: 25 mai. 2019.

CRESWELL, John W.; POTH, C.N. Qualitative inquiry and research method: choosing among five approaches. 2007.

DEBOIS, Stefan. **Vantagens e desvantagens dos questionários**. 2017. Disponível em: <https://surveyanyplace.com/pt/9-vantagens-e-desvantagens-dos-questionarios/>. Acesso em: 23 fev. 2019.

De BRUIN, Tonia *et al.* Understanding the main phases of developing a maturity assessment model. In: **16th Australasian Conference on Information Systems**. Sydney, p. 8-19, 2005.

De CAROLIS, Anna. *et al.* Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization

roadmap. In: **International Conference on Engineering, Technology and Innovation**, p. 487-495. 2017.

DLAMINI, M.T.; ELOFF, M.M.; ELOFF, J.H.P. Internet of Things: Emerging and Future Scenarios from an Information Security Perspective. **Proceedings of SATNAC 2009: Convergence – 21st Century Lifestyle Enabler**, 2009.

DUARTE, Jefferson. **Modelos de Maturidade – 6 modelos utilizados na gestão de projetos**. 2017. Disponível em: <https://www.gp4us.com.br/modelos-de-maturidade/>. Acesso em: 03 abr. 2018.

DREHER, A. **The Smart Factory of the Future – Part 1**. Belden News, 2016.

EROL, Selim; SCHUMACHER, Andreas; SIHN, Wilfried. Strategic guidance towards Industry 4.0 – a three-stage process model. In: **International Conference on Competitive Manufacturing 2016 (COMA16)**. Stellenbosch, South Africa, p. 495-501, 2016.

ESTÚDIO ABC. Como será o profissional da indústria 4.0?. **Exame**, 2017. Disponível em: <https://exame.com/tecnologia/como-sera-o-profissional-da-industria-4-0/> Acesso em: 13 set. 2018.

FAHEEM, Muhammad; GUNGOR, Vehbi C. Energy efficient and QoS-aware routing protocol for wireless sensor network-based smart grid applications in the context of industry 4.0. **Applied Soft Computing Journal**, v. 68, p. 910-922, 2017.

FIALA, Petr. Information sharing in supply chains. **Omega**, v. 33, p. 419-423, 2004.

FRAZER, Peter; MOULTRIE, James; GREGORY, Mike. The use of maturity models/grids as a tool in assessing product development capability: a review. In: **International Engineering Management Conference**. Cambridge, p. 244-249, 2002.

FREUND, Gislaïne Parra *et al.* Requisitos de Segurança para Provedores de Serviços em Nuvem de acordo com a Norma ISO 27017. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/180295/ST3.4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 mai. 2020.

GALASKE, Nadia *et al.* Workforce management 4.0 – assessment of human factors readiness towards digital manufacturing. **Advances in Intelligent Systems and Computing**. 2018.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer, 2010.

GILL, Martin; VANBOSKIRK, Sha. Digital Maturity Model 4.0. **Benchmarks: Digital Transformation Playbook**, 2016.

GIUNIPERO, Larry C. *et al.* A decade of SCM literature: past, present and future implications. **Journal of supply chain management**, v. 44, n. 4, p. 66-86, 2008.

GODOY, Arilda Schmidt. A pesquisa qualitativa e sua utilização em administração de empresas. **Revista de Administração de Empresas**, p. 65-71, 1995.

GOKALP, Ebru; ŞENER, Umut; EREN, P. Erhan. Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM. *In: International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination*. Springer, Cham, p. 128-142, 2017.

GOKSEN, Yilmaz.; CEVIK, Eda; AVUNDUK, Huseyin. A case analysis on the focus on the maturity models and information technologies. **Procedia Economics and Finance**, v. 19, n. 15, p. 208-216, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00022-2). Acesso em: 24 mai. 2020.

GORECKY, Dominic; KHAMIS, Mohamed; MURA, Katharina. Introduction and establishment of virtual training in the factory of the future. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 30, n. 1, p. 182-190, 2017.

GROFFE, Renato José. **Maturidade no desenvolvimento de software: CMMI e MPS-BR**, 2013. Disponível em: <https://www.devmedia.com.br/maturidade-no-desenvolvimento-desoftware-cmmi-e-mps-br/27010>. Acesso em: 20 abr. 2018.

HEUSER, L.; ALSDORF, C.; WOODS, D. **International Research Forum**. 2008.

HEVNER, Alan R. *et al.* Design Science in Information Systems Research. **MIS Research Center**, p. 75-105, 2004.

HOFMANN, Erik; RUSCH, Marco. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23-34, 2017.

HUBA, Mikuláš; KOZAK, Štefan. From E-learning to Industry 4.0. *In: 2016 International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications*, p. 103-108, 2016.

ISOHERRANEN, V.; KARKKAINEN, M.K.; KESS, P. Operational excellence driven by process maturity reviews: a case study of the ABB corporation. *In: International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Dubai, p. 1372-1376, 2015.

JAEGER, Bjørn; HALSE, Lise Lillebrygfjeld . The IoT Technological Maturity Assessment Scorecard: A Case Study of Norwegian Manufacturing Companies. *In: International Conference on Advances in Production Management Systems*. Springer, Cham, p. 143-150, 2017.

KAGERMANN, H. *et al.* Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry. Final report of the Industrie 4.0. **Working Group Initiative**. Forschungsunion, 2013.

KANG, Hyoung Seok *et al.* Smart Manufacturing: Past Research, Present Findings, and Future Directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 3, n. 1, p. 111-128, 2016.

KANJI, Gopal K. **Total quality management: The Second Industrial Revolution**, p. 3- 12, 1990.

KATSMA, Christiaan P.; MOONEN, Hans M.; van HILLEGGERSBERG, Jos. Supply chain systems maturing towards the internet-of-Things: a framework. *In: 24th Bled eConference*

eFuture: Creating Solutions for the Individual, Organisations and Society Proceedings, p. 478-494, 2011.

KIRNER, Claudio; KIRNER, Tereza Gonçalves. Evolução e tendências da Realidade Virtual e da Realidade Aumentada. **Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências**, v. 1, p. 10-25, 2011.

KLOTZER, Christoph; PFLAUM, Alexander. Toward the development of a maturity model for digitalization within the manufacturing industry's supply chain. **50th HI International Conference on System Sciences**. Waikoloa Village, p. 4210-4219, 2017.

KOHLEGGGER, Michael; MAIER, Ronald; THALMANN, Stefan. Understanding Maturity Models Results of a structured Content Analysis. *In: IKNOW' 09 and I-SEMANTICS' 09*. Graz, Austria, 2009.

KRIZHEVSKY, Alex; SUTSKEVER, Ilya; HINTON, Geoffrey E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *In: Advances in neural information processing systems*, p. 1097-1105, 2012.

JIRKOVSKÝ, Václav; OBITKO, Marek; MAŘÍK, Vladimír. Understanding Data Heterogeneity in the Context of Cyber-Physical Systems Integration. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, n. 2, p. 660-667, 2017.

LAMBERT, Douglas M.; COOPER, Martha C. Issues in supply chain management. **Industrial marketing management**, v. 29, n. 1, p. 65-83, 2000.

LECUN, Yann; BENGIO, Yoshua; HINTON, Geoffrey. Deep learning. **Nature**, v. 521, n. 7553, p. 436, 2015.

LEE, Hau L.; PADMANABHAN, Venkata; WHANG, Seungjin. The bullwhip effect in supply chains. **Sloan management review**, v. 38, p. 93-102, 1997.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A Cyber-Physical Systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.

LEYH, Christian. *et al.* SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0. *In: Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2016 – Federated Conference on*, p. 1297- 1302. 2017.

LI, Di *et al.* A Big-Data enabled load-balancing control for smart manufacturing of Industry 4.0. **Cluster Computing**, v. 20, n. 2, p. 1855-1864. 2017.

LI, Ling. China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made in China 2025" and "Industry 4.0". **Technological Forecasting and Social Change**, 2017.

LI, Xiaomin M. *et al.* A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. **Wireless Networks**, v. 23, n. 1, p. 23-41, 2017.

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

LICHTBLAU, K. *et al.* IMPULS – Industrie 4.0-Readiness. **Impuls-Stiftung des VDMA**. Aachen-Köln, 2015.

LIMA, Erick Douglas *et al.* Explorando padrões e normas associados ao RAMI 4.0: um estudo descritivo. *In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, 2018.

LIU, Hongtao. Research on the Internet Plus, Industry 4.0 and Change in Humanity: a Perspective based on Touch Point Management. **Revista de la Facultad de Ingenieria**, v. 32, n. 1, p. 582-588. 2017.

LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 6, p. 1-10, 2017.

MAASOUMAN, Mohammad Ali.; DEMIRLI, Kudret. Assessment of Lean Maturity Level in Manufacturing Cells. **IFAC-PapersOnLine**, vol. 48, no. 3, pp. 1876-1881, 2015.

MACKENZIE, H. **The Smart Factory of the Future – Part 1**, 2015.

MAGNO, Alexandre *et al.* **Modelos de Maturidade**. 2011.

MAJEED, Aabid Abdul; RUPASINGHE, Thashika D. Internet of things (IoT) embedded future supply chains for industry 4.0: An assessment from an ERP-based fashion apparel and footwear industry. **International Journal of Supply Chain Management**, v. 6, n. 1, p. 25-40, 2017.

MAMOGHLI, Sarra; CASSIVI, Luc; TRUDEL, Sylvie. Supporting business processes through human and IT factors: a maturity model. **Business Process Journal**, v. 24 n. 4, p. 985-1006, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/BPMJ-11-2016-0232>. Acesso em: 24 mai. 2020.

MARCON, P. *et al.* Communication technology for industry 4.0. *In: Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS)*, p. 1694-1697, 2017.

MASTEIKA, Ignas; CEPINSKIS, Jonas. Dynamic capabilities in supply chain management. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 213, n. 1, p. 830-835, 2015.

McCORMACK, Kevin; LADEIRA, Marcelo Bronzo; OLIVEIRA, Marcos Paulo Valadares de. Supply chain maturity and performance in Brazil. **Supply ChainManagement: An International Journal**, v. 13, n. 4, p. 272-282, 2008.

MENEZES, F.M. **A linha do tempo na Engenharia de Produção**, 2015.

MERKEL, Lukas *et al.* Teaching Smart Production: An Insight into the Learning Factory for Cyber-Physical Production Systems (LVP). **Procedia Manufacturing**, v. 9, p. 269-274, 2017.

METTLER, Tobias. **Supply Management im Krankenhaus – Konstruktion und Evaluation eines konfigurierbaren Reifegradmodells zur zielgerichteten Gestaltung**. Göttingen: Sierke Verlag, 2010.

- MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 216-229, abr. 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132007000100015&lng=en&nrm=iso. Acesso em 13 set. 2018.
- MIRANDA, Javier *et al.* From the Internet of Things to the Internet of People. **IEEE Internet Computing**, v. 19, n. 2, p. 40-47, 2015.
- NGAI, E.W. *et al.* Energy and utility management maturity model for sustainable manufacturing process. **International Journal of Production Economics**, v. 146, n. 2, p. 453-464, 2013.
- NOLAN, Richard L. Managing the computer resource: a stage hypothesis. **Communications of the ACM**, v. 16, n. 7, p. 399-405, 1973.
- OLIVER, R.K.; WEBBER, M.D. Supply-Chain Management: logistics catches up with strategy. In: **Christopher, M. (Ed.), Logistics: The Strategic Issues**. Chapman Hall: London, p. 63-75, 1982.
- O'DONOVAN, Peter; BRUTON, Ken; O'SULLIVAN, Dominic T.J. IAMM: a maturity model for measuring industrial analytics capabilities in large-scale manufacturing facilities. **International Journal of Prognostics and Health Management**, v. 7, n. 32, p. 1-11, 2016.
- ORTEGA, João. **Piloto de drone a operador de robô: China oficializa 13 empregos em tecnologia**. Disponível em: <https://www.startse.com/noticia/nova-economia/china-empregos-tech>. Acesso em: 16 out. 2019.
- ORNSTEIN, Rudolf. Gráfico Radar: uma forma alternativa de medir o desempenho econômico-financeiro. **Revista do CRCRS**. Porto Alegre: [s. n.], v. 18, n. 2, 8 jul. 1989.
- OSTERLE, Hubert *et al.* Memorandum on design-oriented information systems research. **European Journal of Information Systems**, v. 20, n. 1, p. 7-10, 2010.
- OZKAYNAK, Fatih; MUHAMAD, Mukhlis. I. Fast Software Implementation of DES for Lightweight Platforms. In: **International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium 2017**, p.1-4, 2017.
- PAGANI, Regina N.; KOVALESKI, João Luiz.; RESENDE, Luis Maurício. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109-2135, 2015.
- PIGOSSO, Daniela C.A.; ROZENFELD, Henrique; McALOONE, Tim C. Ecodesign maturity model: a management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 160-173, 2013.
- PING, Ma; QIANG, Han. Research on information security management mechanism of the industry cloud in manufacturing enterprise. In: **29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)**, IEEE, 2017.
- POSADA, Jorge *et al.* Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 35, n. 2, p. 26-40, 2015.

PREUVENEERS, Davi; ILIE-ZUDOR, Elisabeth. The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0. **Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments**, v. 9, n. 3, p. 287-298, 2017.

PUPO, Fábio; SIMÃO, Edna. 'Indústria 4.0' terá crédito de R\$ 8,6 bi. **Valor Econômico**. Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2018/03/14/industria-4-0-tera-credito-de-r-86-bi.ghtml>. Acesso em: 24 mai. 2018.

QIN, Jian; LIU, Ying; GROSVENOR, R.A. A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond. **Procedia Cirp**, v. 52, p. 173-178, 2016.

RAJNAI, Zoltán.; KOCSIS, István. Assessing industry 4.0 readiness of enterprises. In: Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI). In: **16th World Symposium on. IEEE**, p. 225-230, 2018.

RAO, S. Subba; METTS, Glenn; MONGE, Carlo A. Mora. Electronic commerce development in small and medium sized enterprises: a stage model and its implications. **Business Process Management Journal**, v. 9, n. 1, p. 11-32, 2003.

RAUPP, Fabiano Maury; BEUREN, Ilse Maria. Metodologia da Pesquisa Aplicável às Ciências. **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2006.

REN, Lei *et al.* Cloud manufacturing: key characteristics and applications. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 30, n. 6, p. 501-515, 2017.

REZENDE, S.O. **Mineração de dados**. In: XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, 2005.

RIEL, Andreas *et al.* Integrated design for tackling safety and security challenges of smart products and digital manufacturing. **CIRP**. Anais [...], v. 66, n. 1, p. 177-180, 2017.

RIFKIN, Jeremy. The third industrial revolution: How the Internet, green electricity, and 3-d printing are ushering in a sustainable era of distributed capitalism. **World Financial Review**, v. 1. 2012.

ROBLEK, Vasja; MESKO, Maja; KRAPEZ, Alojz. A complex view of Industry 4.0. **Sage Open**, v. 6, n. 2. 2016.

ROGLINGER, Maximilian; POPPELBUB, Jens; BECKER, Jörg. Maturity models in business process management. **Business Process Management Journal**, v. 18, n. 2, p. 328-346, 2012.

RUTNER, Stephen M.; LANGLEY, John C. Jr. Logistics value: definition, process and measurement. **The International Journal of Logistics Management**, v. 11, n. 2, p. 73-82, 2000.

SANTOS, R.C.; MARTINHO, J.L. An Industry 4.0 maturity model proposal. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2019.

SCHLUGA, Oliver *et al.* Operations security evaluation of IaaS-cloud backend for industry 4.0. In: **CLOSER 2018 – Proceedings of the 8th International Conference on Cloud Computing and Services Science**. Anais [...]. Funchal, 2018.

SCHUMACHER, Andreas; EROL, Selim; SIHN, Wilfried. A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161-166, 2016.

SCHUH, Günther *et al.* Industrie 4.0 maturity index. **Managing the Digital Transformation of Companies**. ACATECH Study. Munich: Herbert Utz Verlag. Disponível em: https://en.acatech.de/wp-content/uploads/sites/6/2018/03/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf. Acesso em: 26 jun. 2017.

SCHWAB, Klaus. **The Fourth Industrial Revolution**. Crown Business: New York, 1 ed., 2016.

SEPPÄNEN, Risto, BLOMQVIST, Kirsimaja, SUNDQVIST, Sanna. Measuring inter-organizational trust – a critical review of the empirical research in 1990-2003. **Industrial Marketing Management**, v. 36, p. 249-265, 2007

SILVA, Maurício C. da. *et al.* 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, jan. 2015. ISSN: 21750556.

SIMPSON, J.A.; WEINER, E.S.C. **The Oxford English dictionary**. New York: Oxford University Press, 2 ed., 1989.

SNASEL, Václav *et al.* Geometrical and topological approaches to Big-Data. **Future Generation Computer Systems-the International Journal of Escience**, v. 67, p. 286-296, 2017.

SOUZA, Talita Ferreira de; GOMES, Carlos Francisco Simões. Assessment of maturity in project management: a bibliometric study of main models. **Procedia Computer Science**, v. 55, p. 92-101, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.012>. Acesso em: 24 mai. 2020.

STARK, John. Product lifecycle management. In: **Product Lifecycle Management**. Springer: Cham, v.1, p. 1-29, 2015.

STOCK, James R.; BOYER, Stefanie L. Developing a consensus definition of supply chain management: a qualitative study. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 39, n. 8, p. 690-711, 2009.

TAO, Fei *et al.* SDMSim: A manufacturing service supply-demand matching simulator under cloud environment. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 45, p. 34-46, 2017.

TARHAN, Ayca; TURETKEN, Oktay; REIJERS, Hajo A. Business process maturity models: A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 75, p. 122-134, 2016.

TASHAKKORI, Abbas; TEDDLIE, Charles. Putting the human back in “human research methodology”. **The researcher in mixed methods research**. 2010.

THOBEN, Klaus-Dieter; WIESNER, Stefan A.; WUEST, Thorsten. “Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples. **International Journal of Automation Technology**, v. 11, n. 1, p. 4-16, 2017.

TONELLI, Flavio *et al.* A novel methodology for manufacturing firms value modeling and mapping to improve operational performance in the industry 4.0 Era. **Procedia CIRP**, v. 57, p. 122-127. 2016.

TUNZELMANN, Nick V. Historical coevolution of governance and technology in the industrial revolutions. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 14, n. 4, p. 365-384, 2003.

TURRIONI J.B.; MELLO C.H. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá. Itajubá: UNIFEI, 2012.

VAN AKEN, Joan Ernst. Management research as a design science: articulating the research products of mode 2 knowledge production in management. **British Journal of Management**, v. 16, n. 1, p. 19-36, 2005.

VAN LOOY Amy *et al.* Choosing the right business process maturity model. **Information and Management**, v. 50, n. 7, p. 466-488, 2013.

VASCONCELOS, R. Reformulação: a versão do Engenheiro 4.0. **Diário de Pernambuco**. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/economia/2018/04/reformulacao-a-versao-do-engenheiro-4-0.html>. Acesso em: 23 abr. 2018.

VENTURELLI, M. RAMI 4.0: Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0. Disponível em: <https://www.automacaoindustrial.info/rami-4-0-modelo-dereferencia-para-arquitetura-da-industria-4-0/>. Acesso em: 20 out. 2017.

WAN, Jiafu *et al.* A Manufacturing Big-Data Solution for Active Preventive Maintenance. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, n. 4, p. 2039-2047, 2017.

WAN, Jiafu *et al.* Context-Aware Cloud Robotics for Material Handling in Cognitive Industrial Internet of Things. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 4, p. 2272-2281, 2017.

WAN, Jiafu *et al.* Mobile services for customization manufacturing systems: An example of industry 4.0. **IEEE Access**, v. 4, p. 8977-8986, 2016.

WAN, Jiafu *et al.* Software-defined Industrial Internet of Things in the context of Industry 4.0. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 20, p. 7373-7380, 2016.

WANG, Shiyong *et al.* Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with Big-Data based feedback and coordination. **Computer Networks**, v. 101, p. 158-168, 2016.

WEBER, Christian *et al.* M2DDM-a maturity model for data-driven manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 173-178, 2017.

WESTERMANN, Thorsten *et al.* Reference architecture and maturity levels for Cyber-Physical Systems in the mechanical engineering industry. *In: International Symposium on Systems Engineering*. Edinburgh: [s. n.], p. 1-6, 2016.

WEYER, Stephan *et al.* Towards Industry 4.0-Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. **Ifac Papersonline**, v. 48, n. 3, p. 579-584, 2015.

WOLLSCHLAEGER, Martin; SAUTER, Thilo; JASPERNEITE, Juergen. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the Internet of things and industry 4.0. **Industrial Electronics Magazine**, v. 11, n. 1, p. 17-27, 2017.

WU, Dazhong; TERPENNY, Janis; SCHAEFER, Dirk. Digital design and manufacturing on the cloud: A review of software and services. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM**, v. 31, n. 1, p. 104-118, 2017.

XU, Panpan *et al.* ViDX: Visual Diagnostics of Assembly Line Performance in Smart Factories. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 23, n. 1, p. 291-300, 2017.

XU, Xiaoya; HUA, Qingsong. Industrial Big-Data Analysis in Smart Factory: current status and research strategies. **IEEE Access**, 2017.

ZARATE, Maximilian *et al.* Building an Industry 4.0. Compliant lab environment to demonstrate connectivity between shop floor and IT levels of an enterprise. *In: IECON 2016-42nd Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, p. 6590-6595, 2016.

APÊNDICE A – Questionário

Questionário enviado aos respondentes das empresas participantes desta pesquisa.

Orientação repassada aos respondentes do questionário:

– Responda as perguntas a seguir de acordo com o escopo e a extensão de implementação dos conceitos e das tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 em sua empresa, escolhendo para cada pergunta uma das respostas indicadas, de acordo com a adaptação feita na escala de pontuação Likert.

Nível 0 – Baixo ou nenhum grau de implementação;

Nível 1 – Ações-piloto planejadas ou em desenvolvimento;

Nível 2 – Implementação iniciada, com alguns benefícios observados;

Nível 3 – Implementação intermediária, que melhorou a competitividade da empresa;

Nível 4 – Implementação avançada, com retornos econômicos claros;

Nível 5 – Referência na aplicação dos conceitos e na implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

Dimensão 1 – Estratégia, estrutura e cultura organizacional

Sua empresa...

- 1.1 – analisa continuamente os impactos da Indústria 4.0 na sua competitividade em médio e longo prazo?
- 1.2 – incorpora os conceitos e as tecnologias da Indústria 4.0 como principais fatores da estratégia competitiva?
- 1.3 – possui indicadores apropriados para monitorar a implementação de ações da Indústria 4.0 com objetivos e metas realistas?
- 1.4 – planeja e realiza investimentos para implementar as tecnologias da Indústria 4.0?
- 1.5 – possui uma estrutura organizacional orientada à inovação e à incorporação de novas tecnologias?
- 1.6 – e a alta gerência fornecem os recursos necessários para a realização das ações de transformação?

- 1.7 – se comunica de maneira ágil e digitalizada com os clientes para obter informações?
- 1.8 – foca nos requisitos dos clientes para definir suas ações estratégicas e operacionais para a transformação da Indústria 4.0?
- 1.9 – compartilha informações relevantes com outras empresas da cadeia de valor para ter um processo de tomada de decisão ágil?
- 1.10 – possui uma coordenação central para as ações transformacionais da Indústria 4.0?
- 1.11 – utiliza algum programa de capacitação dos colaboradores sobre Indústria 4.0?
- 1.12 – busca por incentivos governamentais voltados ao desenvolvimento de novas tecnologias?
- 1.13 – realiza parcerias com instituições de conhecimento?
- 1.14 – utiliza recursos da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*)?
- 1.15 – possui uma cadeia de suprimentos integrada com todos os setores em tempo real?
- 1.16 – faz o uso da fabricação sustentável (planejamento verde)?

Dimensão 2 - Força de trabalho

Sua empresa...

- 2.1 – possui as habilidades técnicas e gerenciais necessárias para implementar as ações transformacionais da Indústria 4.0?
- 2.2 – tem as qualificações necessárias para adquirir habilidades técnicas e gerenciais relacionadas aos conceitos e às tecnologias da Indústria 4.0?
- 2.3 – possui uma estrutura organizacional e os métodos de aprovação de decisão para promover flexibilidade e autonomia de equipamentos e equipes?
- 2.4 – incentiva a criatividade e o empoderamento dos funcionários, considerando os desafios e benefícios da transformação digital?
- 2.5 – observa e incentiva a abertura dos funcionários à inovação e ao aprendizado contínuo, com uma atuação responsiva nas mudanças de contexto?

Dimensão 3 – Fábricas inteligentes

Sua empresa...

- 3.1 – possui gêmeos digitais nas instalações e nos equipamentos de fabricação que praticamente reproduzam o mundo físico?
- 3.2 – possui atualização bidirecional entre as instalações e os equipamentos reais e os gêmeos digitais?
- 3.3 – possui uma infraestrutura de equipamentos com sistemas embarcados que possibilitam a aquisição e o processamento de dados e a comunicação entre si e com outros sistemas?
- 3.4 – possui sistemas de informação, comunicação e operação integrados e capazes de atender aos requisitos interoperacionais?
- 3.5 – coleta dados de sensores e atuadores sem intervenção humana e em tempo real?
- 3.6 – possui equipamentos de fabricação que estão equipados com tecnologias de inteligência artificial e que permitem a melhoria contínua e a tomada de decisões autônomas?
- 3.7 – possui *layouts* ágeis e reconfiguráveis para atender à diversificação e à volatilidade do volume da demanda personalizada de produtos?
- 3.8 – utiliza dispositivos móveis inteligentes para tornar as operações mais flexíveis e otimizadas?

Dimensão 4 – Processos inteligentes

Sua empresa...

- 4.1 – utiliza sistemas de computação em nuvem para armazenar e processar dados?
- 4.2 – utiliza tecnologias e procedimentos para a segurança de recursos humanos e físicos e para a proteção de dados contra uso indevido?
- 4.3 – possui processos produtivos que são capazes de operar de forma autônoma, auxiliados por sistemas de aprendizado de máquina?
- 4.4 – projeta seus principais processos de negócios para o compartilhamento ágil de informações dentro da empresa e com outros parceiros de negócios?

- 4.5 – possui os seus principais processos de negócios digitalizados com sistemas integrados de informação e comunicação?
- 4.6 – pode modelar e simular digitalmente o desempenho de seus principais processos de negócios?
- 4.7 – utiliza recursos de computação visual, como sistemas de supervisão e sistemas de Realidade Virtual e Aumentada para auxiliar as operações?
- 4.8 – utiliza recursos de computação visual que fornecem informações contextuais e interfaces para tarefas?
- 4.9 – utiliza sistemas de separação e classificação de dados para ajudar os principais processos de negócios, analisando grandes volumes de dados vindos de várias fontes e em tempo real?
- 4.10 – utiliza processos industriais como M2M (*Machine to Machine*), que realizam trocas de informações integradas em tempo real?
- 4.11 – possui recursos de *Smart Grids* (rede elétrica inteligente) para a otimização de consumo de energia nos processos industriais?
- 4.12 – realiza manutenções inteligentes?
- 4.13 – possui algum sistema para gerenciar o ciclo de vida do produto?
- 4.14 – possui linhas de produção adaptáveis ou reconfiguráveis?

Dimensão 5 – Produtos e serviços inteligentes

Sua empresa ...

- 5.1 – possui produtos com sistemas embarcados e inteligentes?
- 5.2 – possui produtos que são equipados com sistemas de inteligência artificial para auto-otimização de suas características e de seu desempenho?
- 5.3 – possui produtos com sistemas embarcados e equipados com tecnologias que permitem a comunicação com a fábrica e a análise de suas condições de uso?
- 5.4 – oferece serviços complementares aos produtos, desenvolvidos a partir dos dados coletados sobre as preferências e as condições de uso do cliente?
- 5.5 – possui um projeto de produto digitalizado, que pode ser enviado à fábrica da empresa e a outras empresas de valor de rede?
- 5.6 – utiliza simulação digital para testar as condições de uso e de desempenho dos produtos?

- 5.7 – desenvolve produtos e serviços de acordo com a customização da demanda?
- 5.8 – utiliza recursos e processos que permitem a reconfiguração ágil dos produtos?
- 5.9 – possui produtos com sistemas embarcados integrados a outros sistemas operacionais e de gerenciamento?
- 5.10 – utiliza *microchip* para a rastreabilidade da matéria-prima?
- 5.11 – utiliza *microchip* para a rastreabilidade dos produtos em transformação?
- 5.12 – utiliza *microchip* para a rastreabilidade dos produtos acabados?
- 5.13 – possui recursos para realizar testes e simulações para o desenvolvimento de novos produtos?
- 5.14 – realiza a fabricação aditiva (tridimensional –3D) de produtos completos ou acabados na área de produção?
- 5.15 – permite que o cliente possua acesso para acompanhar as etapas do processo produtivo?
- 5.16 – consegue atender pedidos com lotes variados e fracionados na área de produção?

Dimensão 6 – Tecnologia

Sua empresa ...

- 6.1 – utiliza *Smart Sensores* para a medição de parâmetros na indústria?
- 6.2 – utiliza algum recurso de *Big-Data/Big-Data Analysis*?
- 6.3 – utiliza algum serviço de computação em nuvem (*Cloud Manufacturing*)?
- 6.4 – utiliza algum recurso de inteligência artificial (*Artificial Intelligence*)?
- 6.5 – faz uso de algum recurso de segurança da informação (*Information Security*)?
- 6.6 – utiliza Realidade Aumentada (*Augmented Reality*)?
- 6.7 – utiliza Realidade Virtual (*Virtual Reality*)?