

Tiago Manke Silva

**PROPOSTA DE ROADMAP PARA IMPLEMENTAÇÃO DAS  
TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0**

Monografia submetida ao Programa de  
Graduação da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de Engenheiro Eletricista com  
habilitação em Produção.  
Orientador: Prof. Dr. Diego de Castro  
Fettermann

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Manke, Tiago

Roapmap para implementação das tecnologias da  
Indústria 4.0 : aplicação em empresas de manufatura  
/ Tiago Manke ; orientador, Diego de Castro  
Fettermann, 2018.

79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia de Produção  
Elétrica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Elétrica. 2. Indústria  
4.0. 3. Maturidade tecnológica. 4. Tecnologias. 5.  
Implementação. I. Fettermann, Diego de Castro. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia de Produção Elétrica. III. Título.

Tiago Manke Silva

## **PROPOSTA DE ROADMAP PARA IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0**

Esta Monografia foi julgada adequada para obtenção do Título de “Engenheiro Eletricista com habilitação em Produção” e aprovada em sua forma final pelo curso de Engenharia de Produção Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 29 de junho de 2018.

---

Prof. <sup>a</sup> Marina Bouzon, Dra.  
Coordenador do Curso

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Diego de Casto Fettermann, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Eduardo Ferreira da Silva, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Guilherme Luz Tortorella, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, meus maiores exemplos e motivadores neste período. Obrigado pela oportunidade e por todo o apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço única e exclusivamente ao meu orientador, Prof. Dr. Diego de Castro Fettermann, que ao orientar este trabalho, redefiniu o curso de minha vida profissional. Obrigado pela excelente orientação e incentivo na escolha do tema deste estudo.



## RESUMO

Por meio da integração da tecnologia de informação e comunicação à produtos, operações e sistemas, a Indústria 4.0 promete trazer uma grande mudança nos requisitos necessários para atingir a competitividade de mercado. Entretanto, por se tratar de um tema novo, a falta de conhecimento sobre o passo-a-passo da implementação de suas tecnologias desencoraja as empresas nas tentativas de sua implementação. Desta forma, através de uma associação entre as tecnologias 4.0 e os casos de sucesso presentes na literatura, este estudo aponta recomendações para a implementação da indústria 4.0 em empresas de manufatura de acordo com seu nível de maturidade tecnológica

**Palavras-chave:** Indústria 4.0. Implementação. Modelo de maturidade. Manufatura avançada.





## ABSTRACT

By integrating information and communication technology into products, operations and systems, Industry 4.0 promises to bring a major change in the requirements needed to achieve market competitiveness. However, its new and unfamiliar nature causes a lack of knowledge about the step-by-step implementation of its technologies, which discourages companies from attempting to implement them. Thus, through an association of the 4.0 technologies and success cases presented in the literature, this study points out recommendations for the implementation of industry 4.0 in manufacturing companies according to their level of technological maturity.

**Keywords:** Industry 4.0. Implementation. Maturity Model. Advanced manufacturing.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da metodologia em formato de fluxograma..	42
Figura 2 - Percentagem de maturidade tecnológica por dimensão da empresa X.....	56
Figura 3 - Percentagem de maturidade tecnológica por dimensão da empresa Y.....	58



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Arquitetura do modelo 5C's .....	30
Tabela 2 - Relação entre conceitos e seus campos de análise .....	35
Tabela 3 - Hierarquia final do modelo Readiness. ....	37
Tabela 4 - Dimensões de maturidade e suas características .....	42
Tabela 5 - Dimensões abordadas em cada modelo.....	43
Tabela 6 - Modelos e seus tipos de abordagem. ....	44
Tabela 7 - Dimensões e características da Classificação Estruturação..	45
Tabela 8 - Dimensões e características da Classificação Monitoramento .....	46
Tabela 9 - Dimensões e características da Classificação Controle.....	47
Tabela 10 - Dimensões e características da Classificação Otimização .	48
Tabela 11 - Dimensões e características da Classificação Automação .	49
Tabela 12 - Frequência de tecnologias no nível monitoramento. ....	50
Tabela 13 - Frequência de tecnologias utilizadas no nível Controle. ....	51
Tabela 14 - Frequência de tecnologias utilizadas no nível Otimização. 52	
Tabela 15 - Frequência de tecnologias utilizadas no nível Automação. 53	
Tabela 16 – Os 7 grupos de tecnologias e seus níveis de aplicação. ....	54
Tabela 17 - Recomendações em relação ao nível de maturidade .....	54
Tabela 18 - Relação de casos e usos das tecnologias .....	67
Tabela 19 - Descrição dos casos aplicados em cada empresa .....	69



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
APD – Análise e processamento de dados  
CN – Computação em nuvem  
CNI – Confederação Nacional da Indústria  
CPS – Sistemas cyber-físicos  
DM – Dispositivos móveis  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IOT – Internet of Things  
MA – Manufatura aditiva  
RA – Realidade aumentada  
SGE – Sistemas de Gestão Empresarial





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS .....	23
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>23</b>
1.2	METODOLOGIA DE PESQUISA .....	23
1.3	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	24
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>25</b>
2.1	MODELOS DE MATURIDADE .....	29
<b>2.1.1</b>	<b>Modelo 5c's Architecture .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Modelo Simmi 4.0.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Modelo Readiness.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Modelo PwC.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Modelo Rockwell.....</b>	<b>39</b>
2.2	LEVANTAMENTO DOS CASOS DE SUCESSO 4.0 .....	25
2.3	TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0.....	25
<b>2.3.1</b>	<b>Análise e processamento de dados .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Realidade Aumentada.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Computação em nuvem .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Dispositivos móveis .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Internet of Things (IoT).....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Manufatura aditiva .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Sistemas cyber-físicos (CPS) .....</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>41</b>
3.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA .....	41
3.2	SELEÇÃO DAS DIMENSÕES DE MATURIDADE .....	42
3.3	ASSOCIAÇÃO ENTRE MODELOS E TIPO DE ABORDAGEM .....	43
3.4	PROPOSIÇÃO DE DIAGNÓSTICO DE MATURIDADE .	44
<b>3.4.1</b>	<b>Estruturação.....</b>	<b>45</b>

3.4.2	<b>Monitoramento.....</b>	<b>46</b>
3.4.3	<b>Controle .....</b>	<b>47</b>
3.4.4	<b>Otimização.....</b>	<b>48</b>
3.4.5	<b>Automação.....</b>	<b>48</b>
3.5	<b>ASSOCIAÇÃO ENTRE CLASSIFICAÇÕES E CASOS ....</b>	<b>49</b>
3.5.1	<b>Monitoramento.....</b>	<b>50</b>
3.5.2	<b>Controle .....</b>	<b>51</b>
3.5.3	<b>Otimização.....</b>	<b>52</b>
3.5.4	<b>Automação.....</b>	<b>52</b>
3.5.5	<b>Resumo de Tecnologias e proposta de Roadmap .....</b>	<b>53</b>
4	<b>APLICAÇÃO .....</b>	<b>55</b>
4.1	<b>METODOLOGIA DE APLICAÇÃO.....</b>	<b>55</b>
4.2	<b>EMPRESA X.....</b>	<b>55</b>
4.2.1	<b>Resultados do Modelo de Maturidade .....</b>	<b>55</b>
4.3	<b>EMPRESA Y.....</b>	<b>57</b>
4.3.1	<b>Resultados do Modelo de Maturidade .....</b>	<b>57</b>
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>67</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda pela diversificação, qualidade e rapidez na entrega de produtos exige a inovação dos atuais sistemas de manufatura (EVANS; ANNUNZIATA, 2012). Da mesma forma, o avanço da tecnologia e internet em direção à automação e digitalização de processos proporciona novas perspectivas de sucesso e redireciona os requisitos necessários para que se atinja a maior competitividade. Esse cenário requisita que os sistemas de tecnologia da informação integrem as diversas variáveis que compõe uma empresa, uma vez que promovem agilidade na troca de informações e comunicação entre processos e operações (EVANS; ANNUNZIATA, 2012; WRIGHT, 2014; HELU et al., 2015). Esta necessidade de integração demandará não somente a adaptação dos processos existentes, como também o desenvolvimento e a incorporação de novas tecnologias de hardware e software. Segundo Schumacher (2016), a integração de objetos físicos, interações humanas, processos, linhas de produção e máquinas inteligentes resulta no desenvolvimento de uma cadeia de valor nova, mais inteligente, conectada e ágil.

De acordo com Schwab (2016), estamos atravessando uma revolução tecnológica que transformará fundamentalmente a forma como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos. Em sua escala, alcance e complexidade, a transformação será diferente de qualquer coisa que o ser humano tenha experimentado antes. A revolução sobre a qual o autor acima se refere é chamada de Indústria 4.0 e propõe a criação de um cenário no qual as tecnologias de informação e automação – ao invés da mão de obra de baixo custo – é que gerem as vantagens competitivas (RIZZO, 2016). Até 2025, os processos referentes à Indústria 4.0 em escala mundial prometem reduzir os custos de manutenção de equipamentos entre 10% e 40%; reduzir o consumo de energia entre 10% e 20%; e aumentar a eficiência do trabalho entre 10% e 25% (MCKINSEY, 2015). Além disso, de acordo com uma pesquisa recente realizada pela Confederação Nacional da Indústria, dos 24 setores da indústria brasileira, 14 precisariam adotar com urgência as estratégias de digitalização da Indústria 4.0 para se tornarem internacionalmente competitivos (CNI, 2018).

Portanto, o desenvolvimento da Indústria 4.0 tem por objetivo atingir altos níveis de eficiência operacional, produtividade, customização em massa e automação de sistemas produtivos (THAMES; SCHAEFER, 2016; SHAFIQ et al., 2016). Para isso, duas

tecnologias-chave se fazem necessárias: os sistemas cyber-físicos e a Internet das Coisas (DAVIES; COOLE; SMITH, 2017).

Sistemas cyber-físicos consistem na integração de sistemas elétricos, mecânicos, hardwares e softwares, e promovem a comunicação entre si via sensores e atuadores (ALUR, 2015). Segundo Kagermann (2013), essa tecnologia permite que a produção seja configurada de forma mais flexível. A Internet das Coisas possibilita a criação de redes que incorporam todo o processo de fabricação e permite a troca de informações entre produto, máquina e homem. Essa capacidade torna a acessibilidade e gerenciamento dessas informações mais conveniente e estratégico (UCKELMANN, 2011; KAGERMANN et al. 2013).

Ao dominar essas tecnologias, tem-se a Indústria 4.0, aqui definida como a transição de sistemas de produção centralizados em direção à sua flexibilização. Os produtos, máquinas e processos são digitalizados e conectados entre si, compartilhando informações em tempo real nas direções vertical e horizontal. As operações são controladas de forma autônoma e atendem as necessidades dos clientes de maneira mais eficiente (WEYER et al., 2015; LEYH et al., 2016; DAVIES et al., 2017).

Uma empresa que contém produtos inteligentes considera a matéria-prima e as peças em processamento como partes ativas de seu sistema de produção. Nesse sistema, os produtos inteligentes possuem memória para armazenagem de dados operacionais e têm capacidade de coordenar processos produtivos, solicitando os recursos necessários para conclusão de sua fabricação (LOSKYLL, 2012). Desta forma, considera-se que um produto inteligente conhece o seu estado, posição, histórico, fluxos possíveis e destino final. Da mesma maneira, uma máquina inteligente conhece sua capacidade, rotina de manutenção, configurações e *setups* disponíveis (ALMADA-LOBO, 2016). Aliadas à capacidade de comunicação autônoma entre si e entre outros dispositivos, as máquinas inteligentes tornam a linha de produção mais flexível e modular (MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017). Por fim, o operador inteligente é o responsável pela automação das informações da produção (GORECKY, 2014). Seu objetivo é descrever, monitorar e verificar as informações relacionadas às estratégias da produção. O operador inteligente possui suporte de interfaces móveis conectadas às etapas do sistema de produção e têm controle em tempo real das informações da produção. Embora que a Indústria 4.0 proporcione a automação de sistemas como um de seus pontos fortes, a garantia de

qualidade final dos produtos ainda é uma função fundamental dos operadores inteligentes (KAGERMANN, 2013).

Segundo Kagermann (2013), a Indústria 4.0 apresenta como foco os seguintes aspectos:

- I. Integração horizontal através das redes de valor;
- II. Integração vertical através de sistemas de gestão empresarial (SGE); e
- III. Integração digital da engenharia em toda a cadeia de valor.

A integração horizontal refere-se à integração dos sistemas de tecnologia de informação (TI) nas diferentes etapas dos processos de fabricação. Os sistemas envolvem tanto processos referentes à uma mesma empresa (processos logísticos, de produção e marketing) como processos entre diferentes empresas, aqui indicadas como redes de valor. De maneira similar, a integração vertical também refere-se à integração dos sistemas de TI, porém nos diferentes níveis hierárquicos da empresa (operacional, tático e estratégico). Por fim, a integração digital da engenharia exige que os sistemas de TI ofereçam suporte à fabricação de um produto de forma consistente e contínua ao longo de toda a cadeia de suprimentos.

Desta forma, a Indústria 4.0 representa a tendência no aumento do uso de tecnologias de informação e comunicação para promover a automação do ambiente fabril (MUELLER; CHEN; RIEDEL, 2017). Vários programas com o objetivo de promover a implementação da Indústria 4.0 têm sido observados ao redor do mundo. Em 2012, o governo dos Estados Unidos, lançou um programa de desenvolvimento industrial denominado “*National strategic plan for advanced manufacturing*”, visando criar um guia de estratégias para auxílio na pesquisa e desenvolvimento em técnicas avançadas de manufatura (National Science and Technology Council Committee; Washington, D.C. 2012). Igualmente, no Reino Unido lançou-se o “*The future of manufacturing: a new era of opportunity and challenge for the UK*”. No Japão, o “*Summary of the White Paper on Manufacturing Industry*” e na China, o “*Made in China 2025*”, entre outros.

Com o aparecimento de tais programas, um grande número de pesquisas acadêmicas também foram realizadas sobre esse assunto. As pesquisas abordam desde conceitos básicos como definições da Indústria 4.0, até conceitos mais avançados sobre as tecnologias necessárias para sua aplicação. Entretanto, segundo Duong e Frank (2016), o grande problema é que embora exista um grande número de

pesquisas sobre o assunto, seus resultados são criticados por serem muito genéricos para serem colocados em prática; ou muito detalhados para serem replicados em outras indústrias. Mueller, Chen e Riedel (2017) corroboram com essa ideia. Por meio de um amplo estudo realizado para identificar o estado atual da arte 4.0, eles concluíram que ainda existe uma grande lacuna entre a teoria acadêmica proposta e a prática. Assim, com o objetivo de conectar prática e teoria sobre esse tema, os autores encorajam a troca de experiências sobre casos aplicados em indústrias. Por fim, Geisberger e Broy (2012) afirmam que o conceito de Indústria 4.0 ainda é criticado pela falta de conhecimento sobre seus detalhes, especialmente quando relacionados às aplicações na indústria.

Além de todas as críticas mencionadas, alguns autores ainda divergem quanto aos requisitos necessários para implementar a Indústria 4.0 e atingir seus resultados (DRATH et al, 2014; FORD, 2015; HILGER et al, 2013; LASI et al, 2014; SCHMIDT et al, 2015). Segundo Longo, Nicoletti e Padovano (2017), isso ocorre devido à diversidade dos sistemas encontrados e multiplicidade das soluções disponíveis. Ainda, muitas empresas desconhecem o seu próprio nível de digitalização, aspecto fundamental para a implementação dos conceitos 4.0 (LEYH et al., 2016). Assim, de acordo com Qin, Liu e Grosvenor (2016)

O roteiro de tecnologias necessárias para implementação da Indústria 4.0 ainda não é nítido, e a diferença existente entre os sistemas de manufatura atuais e os requisitados para a Indústria 4.0 revela que existe a necessidade de novas pesquisas até que se atinjam os resultados desejados. A indústria de manufatura está ansiosa em busca de um procedimento hierárquico que as guie no caminho em direção à Indústria 4.0. (Qin, Liu e Grosvenor, 2016. pg. 173-174)

Portanto, a partir da dificuldade de operacionalização da Indústria 4.0 presente nas empresas e corroborada pela literatura, este trabalho tem como questão de pesquisa identificar as tecnologias e aplicações da Indústria 4.0 mais adequadas à implementação de acordo com o nível de maturidade tecnológica encontrado nas empresas.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo geral identificar quais as tecnologias e soluções da Indústria 4.0 mais adequadas para serem implementadas de acordo o estado atual de maturidade tecnológica da empresa. Este objetivo será atingido por meio da aplicação de um diagnóstico que categoriza a empresa de acordo com seu nível de maturidade tecnológica e a limita dentro de um campo de ação específico, onde as tecnologias e soluções mais apropriadas para implementação serão indicadas.

O modelo proposto será aplicado nas seguintes indústrias: metalúrgica (pequeno porte); empresa de filtração industrial (grande porte).

### 1.1.1 Objetivos específicos

- I. Identificar as tecnologias e soluções oferecidas pela Indústria 4.0 para empresas de manufatura;
- II. Identificar as recomendações da literatura e de casos de sucesso sobre a utilização de tais tecnologias e soluções;
- III. Associar as tecnologias à maturidade identificada nos casos revisados;
- IV. Consolidar um procedimento para diagnosticar o nível de maturidade tecnológica da empresa do estudo de caso; e
- V. Aplicar a proposta desenvolvida em empresas de manufatura e montagem.

## 1.2 METODOLOGIA DE PESQUISA

O estudo de caso apresenta-se como procedimento técnico de pesquisa que traz um conhecimento detalhado sobre o tema de análise, além de ser uma excelente maneira de trazer uma abordagem holística e interativa para o ensino e aprendizagem. (FEAGIN; ORUM; SJOBBER, 1991; SILVA; MENEZES, 2001). Desta forma, o procedimento técnico utilizado será em formato de estudo de caso. A metodologia de pesquisa será de natureza aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicações práticas dirigidas à solução de problemas específicos (SILVA; MENEZES, 2001). O objetivo da pesquisa tem caráter exploratório, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses (GIL, 1991). Por fim, a forma de abordagem da pesquisa é considerada

qualitativa, pois trata de características que não são descritas por números, onde a análise de dados é feita de forma indutiva.

### 1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O presente estudo é realizado preponderantemente utilizando fontes de informações relatadas na literatura ou em casos de sucesso, onde verificou-se a falta de algumas informações sobre o processo de implementação da Indústria 4.0 nas empresas, prejudicando a construção da proposta de recomendações. Portanto, a aplicação em um caso específico não permite a validação da proposta realizada, podendo somente ser validada a partir de diversas aplicações em diferentes contextos.

Destaca-se ainda que o presente trabalho delimita-se a analisar o uso das tecnologias da Indústria 4.0 de maneira geral, não objetivando explorar os diferentes níveis de complexidade existentes em cada grupo de tecnologias listadas, mas reconhece-se a importância do futuro aprofundamento do tema.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo é estruturado em cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, desenvolvimento, aplicação e conclusão. No primeiro capítulo, faz-se a contextualização do tema de pesquisa, seguido da justificativa e do objetivo do estudo. Por fim, apresentam-se as limitações do trabalho, o método de pesquisa e sua classificação. No segundo capítulo, estrutura-se a revisão dos casos de sucesso de implementação, das tecnologias da Indústria 4.0 e dos modelos de maturidade presentes na literatura. Esta revisão fornecerá subsídios para construção da proposta do *framework* de implementação e da realização e análise do estudo de caso. O capítulo III destina-se ao desenvolvimento da metodologia aplicada. O capítulo IV destina-se à análise da aplicação prática do estudo de caso. Finalmente, no capítulo V, apresentam-se as considerações finais do trabalho, contribuições da pesquisa e oportunidades direcionadas às pesquisas futuras.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta inicialmente uma revisão sobre as tecnologias utilizadas na Indústria 4.0. Em seguida, revisa-se os casos de sucesso da literatura, cuja implementação de tais tecnologias será identificada posteriormente. Por fim, revisa-se modelos de maturidade para classificação do nível de maturidade das empresas do estudo de caso.

### 2.1 TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 é marcada por processos de automação e digitalização altamente desenvolvidos, e pelo uso de tecnologias eletrônicas e de informação (ROBLEK; MESKO; KRAPEZ, 2016). Tais tecnologias promovem a integração e análise em tempo real de dados e otimizam os recursos no processo de fabricação, melhorando o desempenho da produção. Dentre as diversas tecnologias da Indústria 4.0, Gruber (2013) e Roblek, Mesko e Krapez (2016) consideram a computação em dispositivos móveis, a computação em nuvem, a análise e processamento de dados (*big-data*) e a IoT como as principais tecnologias da Indústria 4.0. Entretanto, por meio de uma extensa revisão sobre as tecnologias da Indústria 4.0 mencionadas pela literatura, Fettermann et al. (2018) ainda consideram três outras tecnologias como essenciais para o desenvolvimento da Indústria 4.0. São elas: realidade aumentada, manufatura aditiva e sistemas cyber-físicos.

Neste estudo, com o objetivo abranger todas as principais tecnologias da Indústria 4.0 citadas na literatura, optou-se por utilizar como base a classe de tecnologias listadas por Fettermann et al. (2018). Assim, considera-se como tecnologias essenciais da Indústria 4.0:

- I. Análise e processamento de dados;
- II. Realidade aumentada;
- III. Computação em nuvem;
- IV. Dispositivos móveis;
- V. Internet of Things (IoT);
- VI. Manufatura aditiva; e
- VII. Sistemas cyber-físicos (CPS).

### **2.1.1 Análise e processamento de dados**

O desenvolvimento de algoritmos para lidar com grandes quantidades de dados será um dos maiores desafios da Indústria 4.0, pois a integração das tecnologias de informação e comunicação em componentes da linha de produção gerará enormes quantidades de dados variados (LU, 2017). Assim, a primeira classe de tecnologias aqui listada compreende as tecnologias utilizadas para o processamento de grandes números de dados e informações, incorporando algoritmos avançados para otimização dos processos, mineração de dados, big data, autenticação e detecção de fraudes. Além disso, também vistos como uma tendência do ambiente industrial, os sistemas de monitoramento de prognósticos (*machine-learning*) referem-se à capacidade de o computador entender e aprender sobre o interior de um sistema físico através de algoritmos de computação baseados em dados (LEE; KAO; YANG, 2014).

### **2.1.2 Realidade Aumentada**

As aplicações de Realidade Aumentada são adequadas para conectar objetos virtuais e reais. Através da adição de equipamentos e recursos digitais em ambientes físicos, elas aumentam a percepção visual do operador sobre o uso de informações em tempo real (LONGO; NICOLETTI; PADOVANO, 2017).

Russman et al. (2015) afirmam que esses sistemas ainda estão em fase inicial, mas que no futuro, seus usos serão ampliados drasticamente para fornecer aos operadores informações em tempo real, de forma a melhorar a tomada de decisões e os procedimentos de trabalho.

### **2.1.3 Computação em nuvem**

A computação em nuvem fornece um serviço de computação baseado nas redes de Internet que permite o compartilhamento de softwares e plataformas com o usuário final, retirando dele a necessidade de instalá-los localmente (CHEN, 2017). Em outras palavras, essa classe de tecnologias torna possível analisar e processar dados de maneira remota. Portanto, tanto a computação em nuvem quanto a computação através de dispositivos móveis (item 2.3.4), fornecem dados e serviços significativos para a Indústria 4.0 (LU, 2017).

#### **2.1.4 Dispositivos móveis**

Este tipo de tecnologia difere-se do item acima apenas por sua portabilidade, que compreende a utilização de dispositivos móveis (smartphones, tablets e terminais) para acesso às informações hospedadas na nuvem. Assim, seu conceito geral e vantagens são similares aos da computação em nuvem.

#### **2.1.5 Internet of Things (IoT)**

Composta de sistemas físicos incorporados por dispositivos elétricos, mecânicos e eletrônicos, a Internet das Coisas é considerada como uma das tecnologias mais contributivas para o desenvolvimento da Indústria 4.0 (THAMES; SCHAEFER, 2016). Seu objetivo é permitir a troca de informações entre sistemas físicos, que acontece através de tecnologias-chave, como por exemplo, a identificação por radiofrequência (RFID) e os padrões de comunicação *wireless* (ZHONG et al., 2017). Assim, diante de um ambiente fabril equipado com dispositivos IoT, o uso dos recursos de produção acontece sob demanda e seu compartilhamento eficiente pode ser ativado pela aplicação das tecnologias IoT na fabricação (ZHONG et al., 2017).

#### **2.1.6 Manufatura aditiva**

As tecnologias relacionadas à manufatura aditiva são definidas a partir do processo de unir materiais para criar peças e objetos a partir de modelos 3D e são utilizadas principalmente para protótipos e produção de componentes individuais. Com a Indústria 4.0, esses métodos de fabricação serão amplamente utilizados para produzir pequenos lotes de produtos personalizados, oferecendo vantagens em sua construção. (RÜSSMAN et al., 2015). Ainda que seja considerada uma tecnologia recente, novos sistemas de manufatura aditiva melhoraram seu desempenho nos últimos anos e apresentam um grande potencial para atuar na eficiência da produção, bem como nos processos de desenvolvimento e design de produtos. Como exemplo, pode-se citar as empresas do ramo aeronáutico, que estão começando a aplicar a manufatura aditiva em novos projetos para reduzir o peso total da aeronave (CHEN, 2017).

### 2.1.7 Sistemas cyber-físicos (CPS)

Os sistemas cyber-físicos são considerados como o núcleo da estrutura da Indústria 4.0 e consistem em dispositivos que incorporam hardware e software, integrados a sistemas mecânicos ou elétricos. Esses dispositivos, por sua vez, comunicam-se entre si e interagem com o ambiente físico através de sensores e atuadores (DAVIES; COOLE; SMITH, 2017). Segundo Lu (2017), o principal objetivo destes sistemas é preencher os ágeis e dinâmicos requisitos da produção, além de aprimorar, de modo geral, a eficácia e eficiência da fábrica inteira. Os CPS também podem ser desenvolvidos para gerir o *big data* e alavancar a interconectividade das máquinas com o objetivo torná-las inteligentes e auto-adaptáveis (NIST, 2013).

De maneira geral, a implementação de CPS nas fábricas de hoje oferece vantagens que podem ser categorizadas em três etapas: componente, máquina e sistema de produção. Em relação aos componentes, uma vez que os dados sensoriais de componentes críticos foram convertidos em informações, uma cópia virtual de cada componente será responsável por capturar os registros das máquinas e sintetizar suas etapas futuras, promovendo sua autoconsciência e auto-previsão. As máquinas, por sua vez, teriam seus dados (como parâmetros de controle) agregados à informação dos componentes para monitorar seu status e gerar outra cópia virtual, porém agora de cada máquina em particular, para fornecê-las a capacidade de auto-comparação. Por fim, nos sistemas de produção, as informações agregadas de componentes e máquinas fornecem à fábrica a capacidade de auto-configuração e auto-manutenção. Este nível não só garante uma produção com tempo de inatividade praticamente nulo, mas também otimiza o planejamento de produção e os planos de gerenciamento de estoque da fábrica (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

## 2.2 LEVANTAMENTO DOS CASOS DE SUCESSO 4.0

Os reports utilizados nesta monografia apresentam os casos de sucesso na implementação da Indústria 4.0 em empresas de manufatura, no período de 2014 à 2017. Os casos contêm tanto informações referentes ao problema inicial proposto quanto às tecnologias adotadas para solucioná-lo. Como fontes de evidência, utilizou-se as apresentações dos casos em suas fonte primárias. Estas foram então complementadas com suas fontes secundárias, tais como o website da

empresa e demais publicações a respeito dos casos apresentados. No total, foram coletados 76 casos através de três fontes distintas, sendo:

- a. 37 casos retirados de Fettermann, D.C. et al. (2018);
- b. 23 casos retirados de uma consultoria realizada pela Horváth Partners Management Consultants; e
- c. 16 casos retirados da Associação Alemã de Fabricação de Máquinas e Instalações Industriais (VDMA).

As informações específicas dos casos são apresentadas no Apêndice A deste documento.

## 2.3 MODELOS DE MATURIDADE

Um *framework* é considerado como um conjunto de características identificadas por meio de pesquisas que, a partir de uma estrutura interna, promove um ponto de partida para observações e análises (MORSE et al., 2002). Assim, um *framework* captura a funcionalidade comum a várias aplicações que pertencem a um mesmo domínio de problema.

Como mencionado na seção 1.1, o objetivo do estudo é identificar quais as tecnologias e soluções da Indústria 4.0 mais adequadas para serem implementadas de acordo o estado atual de maturidade tecnológica da empresa. Entende-se por maturidade tecnológica o estado de automação e digitalização de produtos, máquinas e processos da empresa. Assim, os modelos revisados a seguir serão utilizados na consolidação dos itens que irão compor o diagnóstico do nível de maturidade da empresa (seção 3.4.1 à 3.4.5).

### 2.3.1 Modelo 5c's Architecture

Criado por Lee, Bagheri, & Kao (2015), este modelo de maturidade aborda a implementação da Indústria 4.0 com base no nível de maturidade dos sistemas cyber-físicos da empresa (BAGHERI et al., 2015; QIN et al., 2016). Para isso, o modelo é dividido em cinco níveis: (i) conexão, (ii) conversão, (iii) cyber, (iv) cognição e (v) configuração.

Conexão (i): Bagheri et al. (2015) afirmam que a capacidade de adquirir dados precisos e confiáveis de máquinas e seus componentes é o primeiro passo para o desenvolvimento de um sistema cyber-físico. Assim, o nível Conexão concentra-se no desenvolvimento das redes de sensores e comunicação sem fio. Os autores ainda ressaltam a

importância quanto ao método utilizado para o gerenciamento de dados – ele deve ser capaz de entregá-los à toda estrutura hierárquica da empresa.

Conversão (ii): ocorre quando os dados brutos coletados no nível anterior são transformados em informações úteis através de tecnologias de análise de dados. O principal objetivo desses dados é tornar o sistema autoconsciente do seu estado de degradação e funcionamento (BAGHERI et al., 2015).

Cyber (iii): cria-se uma central de informações, onde os dados do nível anterior devem chegar até a central a partir de cada máquina conectada à ela, formando uma rede de informações sobre as máquinas. Para isso, é essencial que todos os componentes e máquinas estejam representados em um modelo virtual (*digital modelling*) (BAGHERI et al., 2015). Com essas informações reunidas, as análises passam a ter caráter comparativo, onde o desempenho de uma única máquina pode ser comparado e classificado entre as demais. Além disso, através de análises sobre o histórico de desempenho de cada máquina, é possível prever seu comportamento futuro.

Cognição (iv): o nível Cognição aplica os modelos da inteligência artificial nas redes de fabricação da empresa – atributo considerado como o futuro da manufatura (BAGHERI et al., 2015). Uma vez que a informação comparativa, bem como o estado de funcionamento de cada máquina estão disponíveis, é possível decidir de maneira estratégica sobre as otimizações da empresa. Segundo (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016), esse nível é considerado como o início da Indústria 4.0.

Configuração (v): ocorre quando existe a resposta do espaço virtual ao espaço físico. Seu objetivo é operar com base na melhoria contínua das máquinas, a fim de torná-las autoconfiguráveis e autoadaptáveis. Além disso, cria-se um Sistema de Controle de Resiliência (RCS), onde as decisões corretivas e preventivas feitas no nível anterior (cognição) são aplicadas aos sistemas de monitoramento das máquinas. Qin, Liu e Grosvenor (2016) consideram o nível Configuração como a realização completa da Indústria 4.0.

Tabela 1 - Arquitetura do modelo 5C's

Nível	Atributo	Função	Output
Conexão	Monitoramento	Conexão entre hardwares	Monitoramento baseado no Estado atual (CBM)
Conversão	Informação	Descoberta de informações	Gerenciamento de Sintomas (PHM)

Cyber	Comparação	Automação de informações	Sistema Cyber-Físico (CPS)
Cognição	Priorização	Manutenção preditiva	Sistema de Suporte à Decisão (DSS)
Configuração	Autoconfiguração	Produção inteligente	Sistema de Controle de Resiliência (RCS)

(Fonte: LEE; BAGHERI; KAO, 2015)

### 2.3.2 Modelo Simmi 4.0

Proposto por LEYH et al. (2016), o framework SIMMI 4.0 é baseado nos ideais propostos Kagermann et al. (2013), que definem três requisitos essenciais para a implementação da Indústria 4.0: integração vertical, integração horizontal e continuidade digital. A integração vertical exige que os dados fornecidos pelos Sistemas de Gestão Empresarial (SGE) sejam armazenados em bancos de dados únicos, onde todos os níveis hierárquicos da empresa tenham acesso. A integração horizontal tem por objetivo evitar falhas e vazamentos em todo o fluxo de informações, tornando a informação acessível e utilizável ao longo de toda a cadeia de suprimentos, para todos os parceiros e com fluxos automatizados. Por fim, a continuidade digital exige que o SGE da empresa suporte desde as etapas de fabricação de um produto até sua distribuição ao longo de toda a cadeia de suprimentos, de forma consistente e contínua.

Para classificar o nível de maturidade tecnológica da empresa, os autores dividiram o modelo em cinco estágios. Cada estágio possui quatro dimensões (ou critérios) de análise correspondentes, que têm por objetivo indicar se a empresa está apta a passar para o próximo estágio. As dimensões de análise são:

- I. **Integração vertical:** concentra-se nos componentes físicos (produtos, máquinas, etc.) de uma empresa, onde a troca de informações entre eles deve existir. Os autores ressaltam que a troca de informações deve ser possibilitada em ambas as direções;
- II. **Integração horizontal:** é a aplicação pura da definição feita por Kagermann et al. (2013), onde é necessário que o fluxo de informações seja automatizado e integrado horizontalmente;
- III. **Desenvolvimento digital:** para que cada etapa do processo produtivo possa representada digitalmente, os autores exigem a

intergração de ao menos um SGE por etapa. Além disso, os dados e informações coletados em cada etapa devem ser encaminhados para as etapas anteriores e seguintes; e

IV. **Crterios de tecnologia transversal:** concentra-se em avaliar a extensão ao qual as tecnologias são utilizadas ao longo de quatro campos da Indústria 4.0, que são: foco no serviço, computação em nuvem, *Big Data* e segurança nas tecnologias de informação. Além disso, o nível de suporte que os SGEs podem fornecer para esses campos também deve ser avaliado. Os estgios de análise da maturidade tecnol3gica s3o: (i) n3vel b3sico de digitaliza3o: caracteriza-se pela aus4ncia de abordagens 4.0 por parte da empresa. Como exemplo de caracter3sticas, tem-se:

- I. Processos com pouca ou nenhuma digitaliza3o;
- II. As abordagens com foco em servi3os e a utiliza3o da nuvem (*cloud computing*) n3o s3o o foco da empresa;
- III. N3o existe prote3o de dados contra a espionagem industrial; e
- IV. N3o existe garantia de disponibilidade de dados em qualquer momento.

Segundo os autores, as principais atividades para conclus3o deste estgio s3o:

- A. Desenvolver iniciativas que tenham por foco a Ind3stria 4.0; e
- B. Elaborar abordagens com foco em servi3os.

(ii) Digitaliza3o interdepartamental: a empresa est3 ativamente envolvida com conceitos da Ind3stria 4.0. No entanto, a troca de dados e informa3es ainda n3o 4 automatizada e as etapas do processo produtivo ainda n3o est3o otimizadas. Como exemplo de caracter3sticas, tem-se:

- I. Digitaliza3o entre departamentos implementada;
- II. Dados n3o s3o centralizados;
- III. Unidades de produ3o est3o conectadas atrav4s de e-mails, pap4is e FTP. A conex3o pela n3vem ainda 4 inexistente;
- IV. As etapas de produ3o e do desenvolvimento de produtos s3o suportadas por SGEs; e
- V. 4 iniciada a implementa3o de uma arquitetura orientada pelo servi3o (*Service-oriented Architecture - SOA*).



As principais atividades para conclusão desse estágio são:

- A. Implementação completa de uma SOA;
- B. Primeiras abordagens para elaboração de um modelo de segurança de TI; e
- C. Primeiros desenvolvimentos de aplicações através de dispositivos móveis.

(iii) Digitalização horizontal e vertical: a empresa é digitalizada horizontal e verticalmente e os fluxos de informações foram automatizados. Todas as etapas do processo de fabricação são suportadas pelos SGEs e suas informações podem ser encaminhadas para a etapa anterior e seguinte. Outras características são:

- I. A troca informações dentro da empresa acontece pela nuvem;
- II. É possível acessar os dados da produção através de dispositivos móveis;
- III. Dados de todas as unidades de produção serão agregados e processados em conjunto, permitindo a otimização e adaptação em tempo real da produção;
- IV. O acesso aos dados empresariais é protegido continuamente contra invasões externas, além de serem transmitidos em estado criptografado; e
- V. A confidencialidade, disponibilidade e integridade dos dados são totalmente garantidas.

As principais atividades para conclusão desse estágio são:

- A. Conexões com outras empresas para criação de novas redes de valor; e
- B. Desenvolvimento de uma plataforma baseada na nuvem que ofereça serviços além das fronteiras da empresa.

(iv) Digitalização completa: a empresa foi completamente digitalizada, mesmo além das fronteiras corporativas. As abordagens da indústria 4.0 são ativamente seguidas e ancoradas dentro da estratégia da empresa. Conseqüentemente, o nível de integração pode ser descrito como interempresarial. Outras características desse estágio são:

- I. As etapas do processo produtivo compartilham automaticamente as informações para a etapa anterior e seguinte; e
- II. Os dados interempresariais são criptografados, possibilitando a troca de informações ao longo da cadeia de suprimentos em tempo real.

As principais atividades para conclusão desse estágio são:

- A. Desenvolver soluções de ponta-a-ponta com empresas parceiras; e
- B. Otimizar os fluxos de informação.

(v) Digitalização completa otimizada: a empresa é uma vitrine para as atividades da indústria 4.0 e colabora fortemente para o avanço 4.0 com seus parceiros de negócios. As características desse estágio são:

- I. Todos os processos, dentro e fora da empresa, são digitalizados;
- II. Além dos processos, nas cadeias de valor, o valor físico e os fluxos de informações também são representados digitalmente, de modo que todo o valor agregado por eles possa ser simulado em tempo real; e
- III. Os problemas relacionados à segurança dos dados virtuais são resolvidos imediatamente.

Os autores não apresentam atividades para conclusão desse estágio. Portanto, a empresa passa a focar na melhoria contínua de seus processos existentes.

### **2.3.3 Modelo Readiness**

Desenvolvido pela IMPULS - Fundação da Federação Alemã de Engenharia, o framework intitulado como *Readiness Model* é baseado em seis conceitos da Indústria 4.0. Igualmente ao framework SIMMI 4.0, este modelo é dotado de indicadores específicos relacionados a cada um dos conceitos e seus cumprimentos são obrigatórios para que a empresa possa ser classificada em níveis superiores. Os seis conceitos de base são:

- I. Estratégia e organização (*Strategy & Organization - S&O*);
- II. Fábrica inteligente (*Smart factory*);

- III. Operações inteligentes (*Smart operations*);
- IV. Produtos inteligentes (*Smart products*);
- V. Serviços baseados em dados (*Data-driven Services*); e
- VI. Funcionários (*Employees*).

Cada um dos seis conceitos é subdividido entre dois a quatro campos, totalizando 18 campos. Esses campos servirão como base para analisar a prontidão das empresas em relação à Indústria 4.0. A tabela a seguir demonstra a relação existente entre os conceitos e seus campos de análise:

Tabela 2 - Relação entre conceitos e seus campos de análise

Conceito	Campo 1	Campo 2	Campo 3	Campo 4
<i>S&amp;O</i>	Tipo de estratégia;	Investimentos;	Gerenciamento da Inovação;	
<i>Smart-factory</i>	Modelagem digital da empresa;	Infraestrutura de equipamentos;	Uso de dados;	Sistemas de Gestão Empresarial;
<i>Smart-operations</i>	Segurança de TI;	Uso de processos da nuvem;	Compartilhamento de informações;	Automação de processos;
<i>Smart-products</i>	Adição de funcionalidades de TI em produtos;	Capacidade de analisar dados na fase de uso do produto;		
<i>Data-driven Services</i>	Serviços baseados em dados;	Compartilhamento de receitas;	Compartilhamento de dados;	
<i>Employees</i>	Capacidade de aquisição de habilidades;	Conjunto de habilidades dos funcionários;		

(Fonte: LICHTBLAU, D. et al., 2015)

Desta forma, de acordo com a conclusão sobre o estado atual das características citadas nos campos acima, o framework classifica as empresas em um de seus seis níveis. São eles: leigo, iniciante, intermediário, experiente, especialista e exemplo.

Nível 1 (Leigo): neste nível, a empresa não atende a nenhum dos requisitos da Indústria 4.0. O nível 1 também é atribuído

automaticamente às empresas que desconhecem o tema ou o tratam com irrelevância.

Nível 2 (Iniciante): a empresa está envolvida pela Indústria 4.0 através de iniciativas piloto. Apenas parte dos processos de produção tem suporte dos sistemas de TI. O compartilhamento de informações integradas no sistema é limitado à algumas áreas. As soluções de segurança de TI ainda estão em fase de planejamento. Em relação ao desenvolvimento do produto, existem iniciativas para concepção de funcionalidades relacionadas à tecnologia de informação.

Nível 3 (Intermediário): a empresa incorpora a Indústria 4.0 em sua estratégia de negócio e possui indicadores apropriados para medir o status de implementação 4.0. Assim, investimentos relevantes podem ser encontrados em algumas áreas. Na produção, alguns dados são coletados automaticamente, mas seu uso é limitado. O compartilhamento interno de informações é integrado pelo SGE e existem iniciativas para expandí-los aos parceiros de negócio. As soluções apropriadas para segurança em TI começam a entrar em vigor. Produtos com as primeiras funcionalidades baseadas em TI são criados.

Nível 4 (Experiente): a estratégia da empresa é totalmente baseada na Indústria 4.0. Agora, investimentos relacionados ao tema podem ser encontrados em várias áreas. Os SGEs suportam as etapas-chave do processo produtivo e integram algumas informações relacionadas aos parceiros de negócio da empresa. Todas as soluções de segurança de TI já foram implementadas. São planejadas soluções baseadas em nuvem para acomodar expansão adicional. Nesse nível, a empresa já fabrica produtos com várias funcionalidades complementares às tecnologias de informação. Porém, a empresa ainda não é sistematicamente integrada aos seus clientes.

Nível 5 (Especialista): a empresa monitora todas as suas iniciativas estratégicas 4.0 através de indicadores. Investimentos são encontrados em quase todas as áreas. Os sistemas de TI suportam a maioria dos processos de produção e coletam deles grandes quantidades de dados que posteriormente são utilizados para otimização. O compartilhamento de informações com os parceiros de negócios já é amplamente integrado no sistema. A automação da produção começa a entrar em desenvolvimento por meio da automação de peças e processos. Peças e produto acabado possuem funcionalidades de TI que permitem a coleta de dados durante sua fase de uso, possibilitando análises específicas que gerem serviços baseados especificamente nesses dados. Esses serviços (baseados nos dados coletados) promovem a integração entre o cliente e empresa.

Nível 6 (Exemplo): nesse nível, os autores consideram que os conceitos da Indústria 4.0 estão implementados na empresa. Assim, investimentos para o contínuo desenvolvimento de aplicações 4.0 são encontrados em todos os setores da empresa. Além disso, práticas de gestão da inovação são estabelecidas e realizadas. Através da integração completa dos SGEs à todas as etapas do processo produtivo, a coleta de dados relevantes da produção acontece de maneira automática. A empresa também oferece soluções baseadas na nuvem que promovem arquiteturas de TI flexíveis. A automação de peças e processos-chave é alcançada e os serviços que foram desenvolvidos baseados em dados coletados pelos produtos já representam uma parcela significativa da receita da empresa - o que a torna cada vez mais integrada com o cliente.

Para que os resultados sobre as classificações possam ser tratados de maneira resumida, os autores criaram uma nova hierarquia para classificação das empresas. Agora, os seis níveis de classificação vistos anteriormente são agrupados em três: novatos, aprendizes e líderes. Este agrupamento facilita a extração de conclusões a respeito do progresso de implementação dos conceitos 4.0 nas empresas e a identificação de pontos-chave de ação para o desenvolvimento desse progresso. Portanto, a hierarquia final do modelo Readiness é apresentada na tabela a seguir:

Tabela 3 - Hierarquia final do modelo Readiness.

	<b>Leigo</b>	<b>Iniciante</b>	<b>Intermediário</b>	<b>Experiente</b>	<b>Especialista</b>	<b>Exemplo</b>
Novato	X	X				
Aprendiz			X			
Líder				X	X	X

(Fonte: LICHTBLAU, D. et al., 2015)

Para gerar o resultado da classificação de maturidade, a empresa deve ser classificada com um nível de prontidão em cada um dos conceitos apresentados anteriormente. Essa classificação deve baseada na pontuação mais baixa obtida nos campos referentes àquele conceito. Por fim, os escores de prontidão dos seis conceitos devem ser consolidados através de uma média ponderada para produzir um escore de prontidão geral.

### 2.3.4 Modelo PwC

O estudo realizado pelo grupo PwC explora os benefícios da digitalização das cadeias de valores horizontais e verticais de uma indústria. Com base nas descobertas do estudo, os autores propõem um modelo de maturidade para assistir na implementação dos conceitos 4.0 a partir da avaliação de seis dimensões que resultam em quatro níveis de maturidade: *digital novice*, *vertical integrator*, *horizontal integrator* e *digital champion* (PWC Global Industry 4.0 Survey, 2016). As características descritas em cada nível são apresentadas a seguir:

*Digital Novice*: a digitalização e automação estão presentes apenas nos subprocessos da empresa; a comunicação entre o chão de fábrica e o setor administrativo é integrada parcialmente; a infraestrutura da produção é tradicional, isto é, não tem foco na digitalização; os produtos apresentam suas primeiras soluções através de aplicações digitais (funcionalidades de TI); a coleta de dados analíticos é feita através de métodos semi manuais; e a estrutura de TI dentro da empresa ainda é fragmentada.

*Vertical Integrator*: A empresa atinge a digitalização vertical, isto é, existe a comunicação e integração entre seus processos; a integração de sistemas entre a empresa e seus parceiros externos (redes de valor) é limitada; a estrutura de TI da empresa é considerada homogênea; equipes multidisciplinares para solução de problemas são pouco utilizadas.

*Horizontal Integrator*: a empresa passa a ter seus processos e informações integrados aos de seus parceiros externos, obtendo soluções de ponta-a-ponta; todas as áreas e processos da empresa e de seus parceiros são suportados pelo SGEs.

*Digital Champion*: a empresa é completamente digitalizada e integrada em todas as direções; seus processo são automaticamente otimizados e possuem um modelo de representação virtual; a empresa também conta com sistemas de análise preventiva contra ocorrências indesejadas;

Por fim, o estudo ainda aponta duas plataformas-chave que devem acompanhar todo o processo de desenvolvimento da implementação da Indústria 4.0. São elas:

- I. *Product Lifecycle Management systems (PLM)*: consiste em um conjunto de soluções que se utiliza de ferramentas de tecnologia da informação para criar um banco de dados colaborativo. Esse banco permite gerenciar todo o processo do ciclo de vida de

qualquer produto, desde sua elaboração até sua distribuição. Além disso, o PLM ainda permite que todos os setores da empresa compartilhem dados avançados e específicos sobre as diferentes fases do ciclo de vida dos produtos, reunindo todas as informações partilhadas em uma única base de dados.

- II. *Manufacturing Execution Systems (MES)*: termo utilizado para designar os sistemas focados no gerenciamento das atividades de produção que estabelecem uma ligação direta entre planejamento e chão de fábrica. Os sistemas MES geram informações precisas e em tempo real que promovem a otimização de todas as etapas da produção, desde a emissão de uma ordem até o embarque dos produtos acabados.

### **2.3.5 Modelo Rockwell**

Assim como nos modelos de maturidade propostos por Bagheri et al. (2015) e Leyh et al. (2016), o modelo proposto pela Rockwell Automation possui cinco etapas de desenvolvimento e têm por foco a integração de tecnologias de informação e operação (TI/TO) aos sistemas de produção (ROCKWELLAUTOMATION, 2014). Na primeira etapa – Avaliação – o framework tem como objetivo avaliar o estado das redes de tecnologia de informação e de operações existentes na empresa. Para isso, os dados sobre a sua infraestrutura tecnológica devem ser coletados. Em seguida, os autores indicam a criação de uma estratégia sistemática que assegure a integração de novas tecnologias, processos e pessoas à empresa.

Na fase seguinte – Aprimoramento – começa-se a desenvolver a estratégia traçada para aprimoramento das tecnologias atuais da empresa. Os autores indicam começar pela criação de um esqueleto que suporte a conectividade entre todos os níveis hierárquicos da empresa, isto é, do chão de fábrica até os setores administrativos. Em paralelo, deve-se fazer aprimoramentos nos hardwares e um plano sobre como as tecnologias de informação e operação irão colaborar entre si. No final desta etapa, a empresa deverá contar com uma rede de informações segura.

Na terceira etapa – “WDC” – os responsáveis pelo aprimoramento das TI/TO devem começar o desenvolvimento de um *Working Data Capital* (WDC) para a empresa. O WDC assiste as empresas a converter os dados coletados nas etapas anteriores em dados úteis, isto é, dados que de maneira efetiva tragam ganhos para a empresa. Portanto, ao final desta etapa, os sistemas de TI/TO trazem

informações críticas sobre o desempenho da produção, como custos e tempo de inatividade.

Na quarta etapa – Análise – a empresa deverá dispor de mecanismos que respondem pró-ativamente à medida que problemas na produção são descobertos. Além disso, através da análise de dados fornecidos pelo WDC, a empresa consegue tomar decisões estratégicas de maneira mais coerente e segura. Portanto, essa etapa tem caráter analítico e foca no aprimoramento contínuo da infraestrutura até então criada.

Por fim, o objetivo da quinta etapa – Colaboração – é criar um ambiente onde a capacidade preditiva esteja presente em todas as atividades internas da empresa. Em relação às atividades externas, o objetivo é desenvolver velocidade na comunicação física ou informacional à eventos externos com o objetivo de minimizar as perdas decorrentes desses eventos. Para isso, as redes de TI/TO devem estar incorporadas em atividades relacionadas tanto aos fornecedores quanto aos clientes (ROCKWELLAUTOMATION, 2014).



### **3 DESENVOLVIMENTO**

#### **3.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para a aplicação deste estudo consiste na conclusão dos cinco objetivos específicos listados na seção 1.1.1. Assim, para cada objetivo específico, aplica-se determinada metodologia.

O primeiro objetivo específico será concluído por meio da realização de um levantamento, com base na literatura, sobre as tecnologias e soluções recomendadas para a implementação dos conceitos da Indústria 4.0.

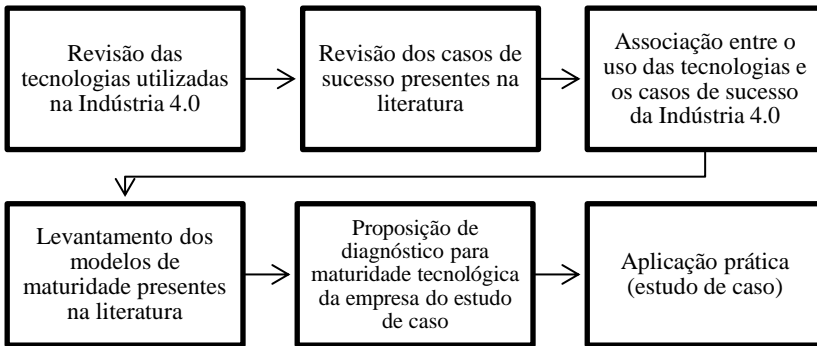
O segundo objetivo específico será concluído por meio da revisão sobre os casos de sucesso de implementação dos conceitos 4.0.

O terceiro objetivo específico será concluído a partir da associação entre as tecnologias listadas no objetivo I e os casos de sucesso revisados no objetivo II. Esta associação será realizada pelo autor e validada por especialistas na área de manufatura.

O quarto objetivo específico será concluído por meio da revisão dos modelos de maturidade encontrados na literatura. Em cada modelo, serão identificadas as similaridades referentes às dimensões de trabalho abordadas e os requisitos específicos necessários para avançar em cada categoria, visando classificar a empresa do estudo de caso de acordo sua maturidade tecnológica.

Por fim, o quinto e último objetivo específico deste estudo será concluído aplicando-se o modelo guia proposto em duas empresas distintas. Como resultado desta aplicação, as recomendações mais indicadas para a implementação das tecnologias 4.0 em cada uma delas serão apresentadas. As características de empresa serão apresentadas na seção 4 deste documento.

Figura 1 - Representação da metodologia em formato de fluxograma.



### 3.2 SELEÇÃO DAS DIMENSÕES DE MATURIDADE

Na literatura, os modelos de maturidade para a Indústria 4.0 abordam diversos aspectos e seus focos variam de acordo com cada autor. Com a proposta de reunir os aspectos já considerados, Schumacher (2013) propõe nove dimensões de trabalho que regem os modelos de maturidade da Indústria 4.0, as quais são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões de maturidade e suas características

<b>Dimensões</b>	<b>Itens de maturidade</b>
Estratégia	Disponibilidade de recursos para implementação 4.0; Adaptação do modelo de negócio; Adoção de guias de implementação, entre outros.
Liderança	Disponibilidade e vontade dos líderes; Métodos e competências para gerenciamento; Existência de uma central de coordenação para I4.0;
Clientes	Utilização de dados dos clientes; Digitalização das vendas e serviços; Mídias digitais com foco no cliente, entre outros.
Produtos	Individualização de produtos; Integração dos produtos em outros sistemas, entre outros.
Operações	Decentralização de processos; Modelagem e simulação; Interdisciplinaridade; Colaboração entre departamentos, entre outros.
Pessoas	Competências da Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) dos empregados; Abertura de funcionários à novas tecnologias; Autonomia de

	funcionários, entre outros.
Governança	Regulações de trabalho para I4.0; Adequação de padrões tecnológicos; Proteção da propriedade intelectual;
Tecnologia	Existência de TIC modernas; Utilização de aparelhos móveis; Utilização da comunicação entre máquinas, entre outros.
Cultura	Compartilhamento do conhecimento; Colaborações nas redes de valor; Valor dado às TIC, entre outros.

Fonte: (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016)

Entende-se por maturidade tecnológica o estado de automação e digitalização de produtos, máquinas e processos da empresa. Desta forma, serão consideradas como objeto de análise as seguintes dimensões de trabalho: Produtos, Operações e Tecnologia.

Tabela 5 - Dimensões abordadas em cada modelo

Dimensões	IMPULS (2013)	Bagheri et al. (2015)	Qin et al. (2016)	Leyh et al. (2016)	Reinhard (2016)	Rockwell (2014)
Estratégia	X					
Liderança						
Serviços	X			X		
Produtos	X	X	X	X	X	
Operações	X	X	X	X	X	X
Pessoas	X			X	X	
Governança						
Tecnologia	X	X	X	X	X	X
Cultura	X				X	X

(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.3 ASSOCIAÇÃO ENTRE MODELOS E TIPO DE ABORDAGEM

Os autores da literatura de modelos de maturidade da Indústria 4.0 abordam este tema de duas formas diferentes. Leyh et al. (2016) e Reinhard et al. (2016) descrevem as características do estado atual da empresa e as relacionam com um de seus níveis de maturidade. Enquanto isso, Bagheri et al. (2015) e Rockwell (2014) descrevem sugestões de melhoria para cada um de seus níveis de maturidade, onde certas ações devem ser realizadas para que se evolua dentro do modelo. Desta forma, o primeiro passo para associar os diferentes modelos de

maturidade é dividindo-os pelo seu tipo de abordagem, descritas na Tabela 6:

Tabela 6 - Modelos e seus tipos de abordagem.

	Abordagem I: estado atual	Abordagem II: sugestão
IMPULS	X	X
Leyh	X	
Reinhard	X	
Bagheri		X
Rockwell		X

(Fonte: elaborado pelo autor)

Desta forma, as análises para construção das Tabelas 7 a 11 serão realizadas de forma independente para cada tipo de abordagem, em que os itens enumerados são referentes aos autores que utilizaram a Abordagem I e os itens não enumerados são referentes aos autores que utilizaram a Abordagem II.

### 3.4 PROPOSIÇÃO DE DIAGNÓSTICO DE MATURIDADE

Com o objetivo de facilitar a leitura e o entendimento do modelo de maturidade proposto, as considerações feitas pelos autores foram agrupadas nas Tabelas 7 à 11. Como a própria literatura sugere, as categorias finais do modelo foram separadas de acordo com o nível de maturidade (Estruturação até Automação) e suas dimensões (Produtos, Operações e Tecnologias).

É importante ressaltar que o nível 6 do modelo IMPULS foi desconsiderado nas análises para agrupamento dos modelos deste estudo. Segundo dados fornecidos pela pesquisa feita pelo grupo IMPULS (2015), apenas 6% das indústrias da Alemanha encontram-se nos níveis 4 a 6. Assim, o índice de indústrias brasileiras que poderiam ser alocadas no nível 6 é insignificante, o que torna sua aplicação no modelo inviável.

Além disso, outras duas considerações foram feitas para a análise de divergências encontradas nos diferentes modelos da literatura:

- I. Os modelos propostos por Bagheri et al (2015), Leyh et al. (2016), Rockwell (2014) e IMPULS (2015) são separados em cinco níveis de maturidade. Enquanto isso, o modelo proposto por Reinhard et al. (2016) é separado em quatro níveis. Desta forma, as características consideradas por Reinhard et al.

(2016), por exemplo, no nível 3, são tecnologicamente mais avançadas do que as consideradas pelos demais autores;

- II. O nível de maturidade tecnológica geral das indústrias do Brasil é menor do que o das indústrias consideradas pelos autores (em sua grande maioria, na Alemanha e Estados Unidos).

Portanto, em virtude dos motivos citados acima, as características divergentes foram alocadas sempre no maior nível dentre as opções, isto é, na existência de uma característica categorizada em níveis diferentes por autores diferentes, optou-se por alocá-la no nível superior.

### 3.4.1 Estruturação

A classificação Estruturação representa a ausência de quaisquer indícios referentes à indústria 4.0 encontrados na empresa. Aqui, classificam-se as empresas cujos produtos, operações e tecnologias são pouco desenvolvidas e, portanto, incapazes de fornecer insumos para a implementação da indústria 4.0.

Tabela 7 - Dimensões e características da Classificação Estruturação

<b>Estruturação</b>	
Produtos	1. Produtos não coletam dados e não possuem funcionalidades de TI; 2. As etapas de desenvolvimento do produto não têm suporte de ferramentas digitais;  Analisar o potencial para introduzir funcionalidades de TIC nos produtos oferecidos pela empresa.
Operações	3. As etapas da produção não tem suporte de SGEs; 4. A integração de SGEs é presente apenas nos setores administrativos; 5. O compartilhamento de informações não é integrado aos sistemas da empresa;  Avaliar o estado das redes de tecnologia de informação e de operações existentes na empresa; Estabelecer (de forma gradual) conexões entre a infraestrutura de equipamentos e máquinas da empresa e sistemas de TI; Estabelecer um planejamento inicial para o compartilhamento de informações internas e externas à empresa;
Tecnologias	6. As máquinas não coletam dados e não podem ser aprimoradas; 7. Não há integração entre máquinas (M2M integration); 8. A infraestrutura do sistema de produção (máquinas, processos) não é capaz de ser controlada por TI; 9. O uso de tecnologias de núvem é inexistente; 10. A segurança das tecnologias de informação é inexistente;  Desenvolver uma rede de sensores e comunicações sem fio no chão de fábrica da empresa - com o objetivo de coletar dados da infraestrutura de máquinas e

equipamentos;  
 Coletar dados sobre a sua infraestrutura tecnológica atual;  
 Estabelecer um planejamento sistemático que assegure a integração de novas tecnologias à infraestrutura de TI da empresa.

(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.4.2 Monitoramento

Esta classificação representa o marco inicial para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Aqui, a empresa já apresenta a infraestrutura tecnológica mínima para a implementação das tecnologias iniciais da indústria 4.0 (sensores, atuadores, implementações em TI). Assim, a empresa já é capaz de realizar ou implementar o monitoramento de alguns processos, máquinas e produtos.

Tabela 8 - Dimensões e características da Classificação Monitoramento

<b>Monitoramento</b>	
Produtos	11. Os primeiros sinais de funcionalidades de TI nos produtos podem ser encontrados; 12. Os produtos são capazes de coletar dados referentes ao seu entorno.
Operações	13. A empresa dá os primeiros passos em direção à integração do compartilhamento de dados e informações aos sistemas de TI; 14. Os principais processos de negócio da empresa são suportados por sistemas de TI (SGEs); 15. As principais etapas do processo produtivo são monitoradas por sistemas de TI (SGEs), porém não são otimizadas;  Promover o acesso à dados através de sistemas de autenticação interna; e Criar um esqueleto que suporte a conexão entre todos os níveis hierárquicos da empresa, isto é, do chão de fábrica até os setores administrativos.
Tecnologias	16. Algumas máquinas e equipamentos são capazes de coletar dados sobre a manufatura; 17. Algumas máquinas e equipamentos podem ser controlados por TI, são interoperáveis ou possuem capacidade de comunicação <i>Machine-2-Machine (M2M)</i> ; 18. As soluções de segurança de TI da empresa encontram-se na fase de planejamento; 19. O uso de tecnologias de nível ainda é inexistente; e 20. A confidencialidade, integridade e disposição de dados à qualquer momento não pode ser garantida.  Transformar os dados brutos coletados no nível anterior em informações úteis através de tecnologias de análise de dados; Desenvolver uma política de segurança de TI; Planejar uma estratégia para o aprimoramento das tecnologias atuais da empresa.

(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.4.3 Controle

A classificação Controle representa as empresas cujos sistemas de gestão da informação têm por foco o aprimoramento da gestão da produção. Isto é, a empresa é capaz de utilizar os dados coletados através do monitoramento de produtos, processos e máquinas para aprimorar o gerenciamento de tais agentes. Como principal exemplo, pode-se citar o acesso à determinadas funções do sistema produtivo de maneira remota.

Tabela 9 - Dimensões e características da Classificação Controle

<b>Controle</b>	
Produtos	21. Os produtos contendo as funcionalidades de TI são lançados no mercado; 22. A análise e processamento de dados coletados a partir das funcionalidades de TI dos produtos é praticamente inexistente (0-20% dos dados coletados são analisados);
Operações	23. O compartilhamento de dados e informações entre departamentos é parcialmente automatizado; 24. Os principais setores da empresa são suportados por sistemas de TI (SGEs); 25. A maioria das etapas do processo de fabricação são suportadas pelos SGEs e suas informações podem ser manualmente encaminhadas para as etapas anteriores e seguintes; 26. A integração de sistemas entre a empresa e seus parceiros externos (redes de valor) existe, mas é limitada; 27. São dados os primeiros passos para a criação de um modelo digital da fábrica ( <i>digital modelling</i> );  Expandir o compartilhamento de informações integradas ao sistema ( <i>SIIS – System-integrated Information Sharing</i> ) horizontal e verticalmente; Analisar de forma sistemática os potenciais usos para todos os tipos dados coletados. Expandir a representação de componentes e máquinas no modelo virtual ( <i>digital modelling</i> ) com o objetivo de formar uma “central de informações” da produção. Desenvolver um <i>Working Data Capital</i> (WDC) para a empresa.
Tecnologias	28. As máquinas produzem dados da produção, mas sua coleta é manual; 29. A empresa conta com sistemas produtivos que podem ser controlados por TI, são interoperáveis ou possuem capacidade de comunicação <i>Machine-2-Machine (M2M)</i> ou <i>Machine-2-Cloud-2-Machine (MCM)</i> ; 30. Algumas máquinas e/ou sistemas produtivos da empresa possuem capacidade de aprimoramento; 31. O compartilhamento de informações internas da empresa acontece pela nuvem; 32. É possível acessar os dados da produção através de dispositivos móveis; 33. Múltiplas soluções de segurança de TI estão em desenvolvimento; 34. O acesso aos dados internos da empresa é protegido continuamente contra invasões externas, além de serem transmitidos em estado criptografado; e 35. A confidencialidade, disponibilidade e integridade dos dados da empresa são totalmente garantidas.

Planejar a infraestrutura de equipamentos integrados com TI necessária;

(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.4.4 Otimização

A classificação Otimização representa as empresas capazes de aprimorar não apenas a gestão de seu sistema produtivo, mas também a eficiência com que produtos e processos são realizados. Isto é, a empresa é capaz de otimizar os agentes do seu sistema produtivo por meio da análise de dados coletados via sensores.

Tabela 10 - Dimensões e características da Classificação Otimização

Otimização	
Produtos	36. Os produtos da empresa contam com várias funcionalidades de TI; 37. A análise e processamento dos dados coletados via sensores é realizada com frequência.
Operações	Expandir o escopo de funcionalidades de TI contidas nos produtos. 38. O compartilhamento de dados e informações entre departamentos é automatizado; 39. O compartilhamento de dados e informações entre as etapas do processo produtivo é automatizado; 40. Os sistemas de TI suportam todos os processos de produção e coletam deles grandes quantidades de dados que posteriormente são utilizados para otimizações; 41. Os SGEs da empresa integram informações de parceiros externos; 42. Os principais processos da empresa possuem representação através de um modelo virtual;
Tecnologias	Expandir a coleção de dados digitais obtidos; 43. Os dados interempresariais são criptografados; 44. As soluções de segurança de TI já foram completamente implementadas;  Aprimorar a infraestrutura de tecnologias da empresa. Implementar as tecnologias <i>Autonomously Guided Workpieces (AGW)</i> e <i>Self-Reacting Processes (SRP)</i> ; Implementar tecnologias de inteligência artificial à rede para possibilitar que as otimizações e decisões estratégicas sejam feitas de maneira automática; Implementar mecanismos que respondem pró-ativamente à medida em que problemas na produção são descobertos.

(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.4.5 Automação

As empresas categorizadas neste nível utilizam as tecnologias e recursos mais avançados disponíveis pela indústria 4.0. Suas máquinas e processos produtivos são capazes de incorporar as otimizações



aplicáveis à si sem a necessidade de grandes intervenções humanas. Como exemplo, pode-se citar as empresas cuja predominância de máquinas e processos são programados por meio de algoritmos baseados nas técnicas de *machine learning*.

Tabela 11 - Dimensões e características da Classificação Automação

Automação	
Produtos	45. As características e recomendações para esse nível são as mesmas sugeridas no nível anterior.
Operações	46. A empresa é completamente digitalizada em todas as direções e seu nível de integração pode ser descrito como interempresarial; 47. Os processos da empresa são automaticamente otimizados; 48. O compartilhamento de informações com os parceiros de negócios é amplamente integrado no sistema; 49. A empresa incorpora os parceiros de negócio em sua representação virtual, de modo que todo o valor agregado pelos fluxos físicos e de informação (referentes às redes de valor) possam ser simulados em tempo real;  Em relação às atividades externas, desenvolver a velocidade na comunicação física e informacional na ocorrência de eventos inesperados a fim de minimizar danos.
Tecnologias	50. A automação da produção começa a entrar em desenvolvimento através da automação de peças e processos ( <i>AGW e SRP</i> ); 51. Os problemas relacionados à segurança dos dados virtuais podem ser resolvidos imediatamente; 52. A criptografia de dados é otimizada ao longo das redes de valor; 53. A empresa conta com sistemas de análise preventiva contra ocorrências indesejadas;  Aprimorar gradualmente os equipamentos e máquinas a fim de torná-los auto-configuráveis e auto-adaptáveis. Criar um ambiente onde a capacidade preditiva esteja presente em todas as atividades internas da empresa.

(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.5 ASSOCIAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS E CASOS

Para realizar a associação entre as tecnologias e os casos de sucesso, é necessário primeiramente classificar as soluções encontradas nos casos revisados, pois é a partir da relação das tecnologias encontradas em cada caso que tal associação será realizada. Desta forma, optou-se por utilizar como base a classificação proposta por Porter e Heppelmann (2015), que consiste em quatro níveis de maturidade: (i) monitoramento, (ii) controle, (iii) otimização e (iv) automação. Tal escolha é justificada para garantir a padronização na análise dos casos de sucesso, visto que os casos retirados de Fettermann et al. (2018) também foram analisados com base na classificação de

Porter e Heppelmann (2015). Assim, o nível de (i) monitoramento incorpora os casos que aplicam tecnologias para monitorar e relatar informações do ambiente em tempo real, gerando novos dados e informações para o processo. Os casos classificados como nível de controle (ii) integram aplicativos que podem controlar a operação do sistema através de softwares internos ou pela nuvem. O nível de otimização (iii) refere-se a casos que utilizam algoritmos ou análises de dados capazes de otimizar o funcionamento do sistema, seu uso e manutenção. Por fim, os casos classificados como nível de automação (iv) são aqueles cujo sistema incorpora na solução a capacidade de aprender e se adaptar ao ambiente para aumentar o seu desempenho (PORTER; HEPPELMANN, 2015).

Desta forma, para cada um dos 76 casos de sucesso coletados na seção 2.2, listou-se os grupos de tecnologias utilizados e seu nível de maturidade segundo a base proposta por Porter e Heppelmann (2015). Em seguida, calculou-se a frequência com que cada grupo de tecnologias fora utilizado em relação aos níveis de maturidade. O resultado é apresentado nos itens a seguir.

### 3.5.1 Monitoramento

No nível Monitoramento, o grupo de tecnologias que apresentou resultados mais expressivos foi o relacionado à IoT, com 30 utilizações em um total de 42 casos. A adoção destas tecnologias (sensores e atuadores) na indústria permite incorporar as informações de objetos físicos (máquinas e seus componentes) ao mundo virtual, e a aquisição desses dados é o primeiro passo no desenvolvimento de uma aplicação de sistemas cyberfísicos e conseqüentemente, da Indústria 4.0 (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Em outras palavras, a IoT é considerada como a infraestrutura técnica básica para a construção de sistemas cyberfísicos (OKS; FRITZSCHE, 2015; MUELLER; CHEN; RIEDEL, 2017).

Desta forma, pela alta representatividade das tecnologias IoT presentes nos casos de nível Monitoramento (71%), infere-se que tal relação está de acordo com a teoria apresentada na literatura e conclui-se que o primeiro passo para a implementação da Indústria 4.0 deve ser dado por meio das aplicações de tecnologias referentes à IoT.

Tabela 12 - Frequência de tecnologias no nível monitoramento.

<b>Monitoramento</b>	
Análise e processamento de dados	7 (17%)
Realidade aumentada	7 (17%)

Computação em nuvem	4 (10%)
Dispositivos móveis	11 (26%)
<b>Internet of Things</b>	<b>30 (71%)</b>
Manufatura Aditiva	0 (0%)
Sistemas cyberfísicos	9 (21%)

Legenda: Frequência (percentual total)  
(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.5.2 Controle

Nos casos de nível Controle, o grupo de tecnologias relacionadas aos Sistemas cyberfísicos foi o que recebeu maior destaque, estando presente em 60% dos casos. Segundo Liu et al. (2017), a função deste tipo de tecnologia é conduzir o controle de feedbacks em sistemas embarcados através da combinação de tecnologias de computação, comunicação e controle. A geração contínua de grandes volumes de dados (*big data*) devido ao uso crescente de sensores e máquinas em rede faz com que este tipo de tecnologia também possa ser desenvolvido para gerenciar tais dados e alavancar a interconectividade de máquinas, promovendo maior controle sobre elas (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

É importante observar que existe uma grande variação no uso de tecnologias CPS entre os níveis Monitoramento e Controle: de 21% para 60% dos casos. Isso indica que, de maneira geral, as tecnologias de CPS começam a ser implementadas somente no nível de controle, e, portanto, estão mais relacionadas a esse nível do que ao nível de monitoramento. A partir deste cenário, conclui-se que os casos encontrados na prática estão de acordo com o que é proposto pela literatura, concordando que o grupo de tecnologias mais indicado no nível de controle é o de sistemas cyber-físicos.

Por fim, observa-se que as tecnologias de IoT não se limitam ao nível de monitoramento, já que também possuem grande representatividade (53%) no nível de controle – essa característica também poderá ser observada nos níveis de otimização e automação.

Tabela 13 - Frequência de tecnologias utilizadas no nível Controle.

<b>Controle</b>	
Análise e processamento de dados	0 (0%)
Realidade aumentada	2 (13%)
Computação em nuvem	2 (13%)
Dispositivos móveis	4 (27%)
<b>Internet of Things</b>	<b>8 (53%)</b>
Manufatura Aditiva	0 (0%)
<b>Sistemas cyberfísicos</b>	<b>9 (60%)</b>

Legenda: Frequência (percentual total)  
(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.5.3 Otimização

A principal diferença do nível de otimização para o anterior é a evolução na utilização das tecnologias de análise e processamento de dados – de 0% para 75%. Aqui, como as informações essenciais dos componentes de um sistema produtivo já estão disponíveis, a inclusão dessas tecnologias auxilia na tomada de decisões a partir da otimização de processos diversos (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Assim, tecnologias envolvendo cálculos numéricos, controle lógico programável (algoritmos) e análise estatística de probabilidade são utilizadas para otimizar a eficiência da produção (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016). Logo, conclui-se que as tecnologias de análise de processamento de dados relacionam-se fortemente com o nível de maturidade Otimização.

Além disso, observa-se que as tecnologias de CPS e IoT ainda se mantém presentes com grande representatividade. Como explicado no item 1.1.1 deste documento, isto se dá pelo fato de que essas tecnologias são consideradas como a base da Indústria 4.0, estando contidas em praticamente todas as suas aplicações.

Tabela 14 - Frequência de tecnologias utilizadas no nível Otimização.

<b>Otimização</b>	
<b>Análise e processamento de dados</b>	<b>9 (75%)</b>
Realidade aumentada	0 (0%)
Computação em nuvem	2 (17%)
Dispositivos móveis	0 (0%)
<b>Internet of Things</b>	<b>9 (75%)</b>
Manufatura Aditiva	0 (0%)
<b>Sistemas cyberfísicos</b>	<b>5 (42%)</b>

Legenda: Frequência (percentual total)

(Fonte: elaborado pelo autor)

### 3.5.4 Automação

Por fim, a principal diferença do nível de automação para o nível anterior é a adição das tecnologias relacionadas à manufatura aditiva. Entretanto, por se tratar de uma amostra pequena – apenas 1 caso documentado – não é possível ter maiores conclusões sobre esse grupo de tecnologias.

Assim como no nível anterior, as tecnologias mais representativas são as relacionadas à IoT, CPS e Análise e processamento de dados (APD). A grande diferença para o nível anterior é em relação à complexidade do uso de suas tecnologias – aqui, objetiva-se a

capacidade de auto-configuração e auto-otimização dos agentes que compõem o sistema produtivo.

Tabela 15 - Frequência de tecnologias utilizadas no nível Automação.

<b>Automação</b>	
<b>Análise e processamento de dados</b>	<b>3 (43%)</b>
Realidade aumentada	0 (0%)
Computação em nuvem	0 (0%)
Dispositivos móveis	0 (0%)
<b>Internet of Things</b>	<b>5 (71%)</b>
<b>Manufatura Aditiva</b>	<b>1 (14%)</b>
<b>Sistemas cyberfísicos</b>	<b>5 (71%)</b>

Legenda: Frequência (percentual total)

(Fonte: elaborado pelo autor)

### **3.5.5 Resumo de Tecnologias e Proposta de Roadmap**

As tecnologias relacionadas à APD concentraram-se principalmente entre os níveis de implementação mais avançados, pois envolvem diversos tipos de análises e algoritmos que necessitam de dados coletados anteriormente.

Observa-se que as tecnologias relacionadas à Realidade aumentada, Computação em nuvem e Dispositivos móveis estão mais presentes nos níveis iniciais de implementação. Em particular, as duas últimas fornecem dados e serviços importantes para futuras implementações através da integração das redes de IoT presentes na empresa (LU, 2017). Assim, elas são justificadas nestes níveis pois criam a fundação para posteriores aplicações de tecnologias mais avançadas. Assim, com a ajuda dessas tecnologias, a organização desenvolve primeiramente a estrutura de TI que fornecerá uma conectividade segura e adaptável entre o chão de fábrica e os demais departamentos (ROCKWELLAUTOMATION, 2014).

Em virtude da reduzida quantidade de casos registrados, as tecnologias relacionadas à Manufatura Aditiva não dispõem de conclusões concretas. A literatura cita que esse tipo de tecnologia ainda está em fase de desenvolvimento, mas que promete trazer grandes transformações na indústria (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0, 2016; CHEN, 2017).

Por fim, consideradas como as bases da Indústria 4.0, as tecnologias relacionadas à IoT e CPS possuem grande representatividade em todos os níveis. A única exceção é em relação as tecnologias de CPS no nível de monitoramento – 21% dos casos – já

que por muitas vezes a implementação deste tipo de tecnologia necessita de dados coletados no nível de monitoramento.

Tabela 16 – Os 7 grupos de tecnologias e seus níveis de aplicação.

	Análise e Processam. de Dados	Realidade Aumentada	Computação na Nuvem	Dispositivos Móveis	Internet of Things	Manufatura Aditiva	Cyber Physical Systems
<b>Monitoramento</b>	17%	17%	10%	26%	71%	0%	21%
<b>Controle</b>	0%	13%	13%	27%	53%	0%	60%
<b>Otimização</b>	75%	0%	17%	0%	75%	0%	42%
<b>Automação</b>	43%	0%	0%	0%	71%	14%	71%

(Fonte: elaborado pelo autor)

É importante ressaltar que para as análises do estudo de caso a seguir, as recomendações dadas às empresas classificadas nos níveis de Estruturação e Monitoramento pertencem ao mesmo conjunto de tecnologias, porém com complexidade e intensidade diferentes. Isto ocorre porque as classificações de tecnologias apresentadas no item 3.5 foram baseadas em casos de sucesso de empresas situadas na Alemanha e Japão, que devido ao alto padrão do setor industrial de ambos os países, encontram-se em níveis superiores ao nível de Estruturação. Portanto, a proposta de de roadmap para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 é:

Tabela 17 - Recomendações em relação ao nível de maturidade

Nível de maturidade	Recomendações de tecnologias	Prioridade de tecnologias para implementação		
Estruturação	Monitoramento (baixa complexidade)	Internet of Things	Dispositivos móveis	Cyber-Physical Systems
Monitoramento	Monitoramento (alta complexidade)	Internet of Things	Dispositivos móveis	Cyber-Physical Systems
Controle	Controle	Cyber-Physical Systems	Internet of Things	Dispositivos móveis
Otimização	Otimização	Análise e Processamento de Dados	Internet of Things	Cyber-Physical Systems
Automação	Automação	Cyber-Physical Systems	Internet of Things	Análise e Processamento de Dados

## **4 APLICAÇÃO**

### **4.1 METODOLOGIA DE APLICAÇÃO**

A aplicação do estudo de caso foi dividida em três partes: visita técnica, análise técnica e proposição de soluções, as quais estão detalhadas abaixo:

- I. Visita técnica: realizada através de visitas até a empresa. Tem por objetivo conhecer o fluxo de informações, materiais e processos (administrativos e de manufatura) presentes na empresa através da aplicação do modelo de maturidade proposto. Todas as visitas foram acompanhadas por profissionais efetivos com pleno conhecimento sobre o funcionamento dos fluxos citados acima, capazes de sanar quaisquer dúvidas tidas neste processo.
- II. Análise técnica: análise feita com base nos insumos coletados na etapa anterior. Tem por objetivo categorizar a empresa de acordo com o seu nível de maturidade tecnológica;
- III. Proposição de soluções: realizada através da apresentação do grupo de tecnologias mais apropriado à implementação de acordo com o estado atual de maturidade tecnológica da empresa.

### **4.2 EMPRESA X**

A empresa X é composta por 50 funcionários e pertence ao setor metalúrgico (caldeiraria e solda), atuando em diversos segmentos de mercado, tais como: hidráulico, mecânico, elétrico, têxtil, químico e petroquímico. A produção é feita sob encomenda e seus produtos finais concentram-se principalmente em reservatórios e gabinetes hidráulicos.

Em relação à parte estratégica, a empresa tem como foco a melhoria na Gestão de Qualidade. Isso não inclui apenas a prevenção de falhas e não-conformidades, mas também a detecção de tais problemas no momento em que eles acontecem e a maneira como serão resolvidos.

#### **4.2.1 Resultados do Modelo de Maturidade**

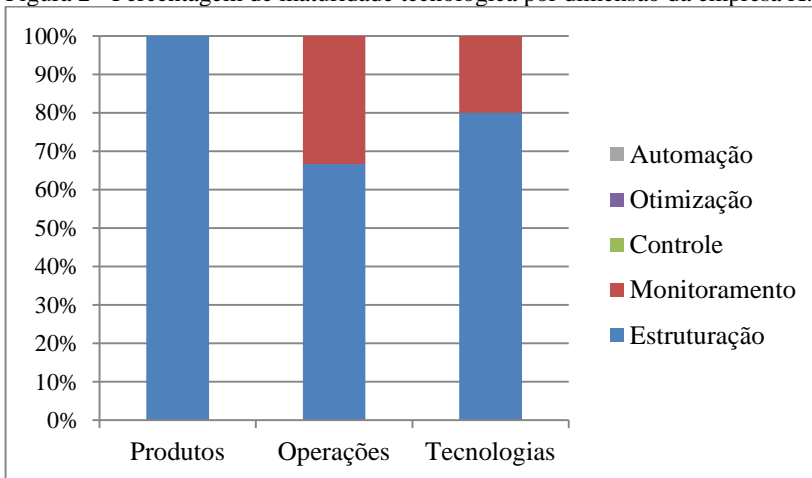
A empresa X não apresentou quaisquer condições que a favoreça na implementação das tecnologias sugeridas pela Indústria 4.0. No

geral, há pouquíssimos artifícios digitais na empresa, o que faz com que o seu nível de maturidade tecnológica seja o menor dentre as opções disponíveis.

Em relação à gestão de informações, a empresa não possui nenhum sistema de gerenciamento empresarial e o seu processo de fabricação é controlado exclusivamente pela ordem de produção que percorre os setores pelos quais o produto é manufaturado. O compartilhamento de informações entre departamentos é feito através de planilhas no Excel que são hospedadas em um servidor local (ao invés de serem hospedadas na nuvem). Os produtos finais não apresentam nenhuma funcionalidade digital e, portanto, não coletam nenhum tipo de dado no decorrer do seu ciclo de vida. Quanto às máquinas e equipamentos, apenas a máquina de corte à laser (CNC) apresenta a tecnologia necessária para a introdução dos conceitos da Indústria 4.0, isto é, possui potencial para aprimoramento digital.

A aplicação do modelo de maturidade proposto na seção 3.4 constatou que a empresa atende 8 dos 10 pontos relacionados ao nível de Estruturação (ou Monitoramento de Baixa Complexidade, conforme Tabela 17), sendo, portanto, classificada neste nível.

Figura 2 - Percentagem de maturidade tecnológica por dimensão da empresa X.



(Fonte: elaborado pelo autor – resultados detalhados no Apêndice)

Com base no resultado obtido por meio da aplicação do modelo de maturidade, a empresa deve estabelecer um planejamento sistemático que assegure a integração de novas tecnologias à infraestrutura de TI.



Isto é, estabelecer de forma gradual as conexões entre a infraestrutura de equipamentos, máquinas e sistemas de TI, além de realizar um planejamento inicial para o compartilhamento de informações internas e externas à empresa. Este planejamento poderia conter (i) a inclusão de um ERP como recurso primário para o gerenciamento e compartilhamento de informações, (ii) a migração do sistema de informação da empresa para a nuvem (*cloud computing*).

Como apresentado no item 3.5.1, o grupo de tecnologias da Indústria 4.0 mais indicado para implementação em níveis de monitoramento é o IoT. Assim, além das recomendações citadas acima, a implementação de sensores e atuadores que realizem a coleta de dados relacionados às prioridades estratégicas da empresa também devem ser planejadas. Visto que o objetivo estratégico da empresa é aprimorar a sua Gestão da Qualidade, uma possível aplicação IoT seria através da instalação de sensores para monitoramento contínuo da vibração dos eixos da máquina de corte à laser CNC. Esse monitoramento é importante, pois o excesso de vibração nos eixos da máquina poderia afetar a qualidade do corte das chapas de aço (efeito tremulação). Assim, uma das opções disponíveis no mercado para solução deste problema é o DynaPredict – dispositivo (*data logger*) sensorial que monitora a saúde de máquinas e equipamentos através da análise contínua de parâmetros como vibração e temperatura. Estes parâmetros podem ser visualizados de forma instantânea em *smartphones* e seu histórico é armazenado na nuvem ou em servidores locais para acesso remoto, permitindo o compartilhamento das informações obtidas à qualquer instante. Além de evitar as falhas de cortes, a empresa também conseguiria reduzir riscos de quebra e incidentes com máquinas e equipamentos, além de gerar economia com manutenções preditivas.

### 4.3 EMPRESA Y

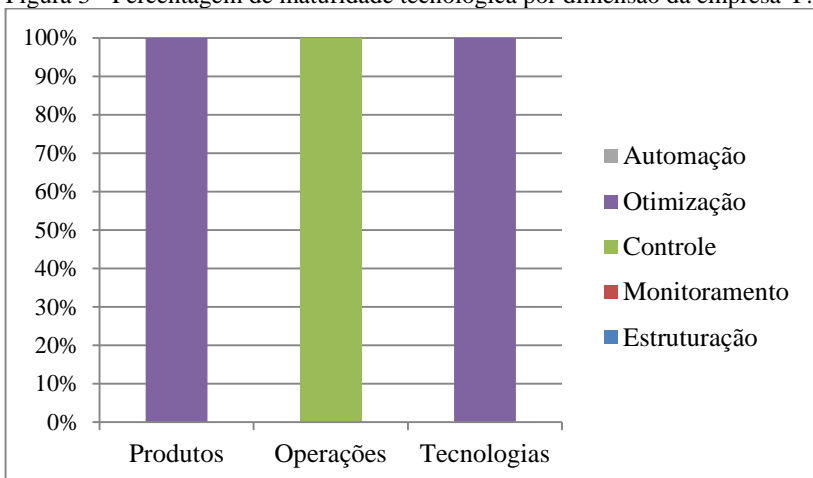
A empresa Y é composta por 400 funcionários e pertence ao ramo de filtragem industrial para alimentos, energia e saúde (tratamento de água e resíduos orgânicos). Seus produtos finais concentram-se principalmente em filtros, prensas, centrífugas e decantadores.

Em relação à parte estratégica, a empresa tem como foco a terceirização total de seu setor produtivo, ficando responsável apenas pelo serviço de montagem dos produtos finais.

#### 4.3.1 Resultados do Modelo de Maturidade

A empresa Y apresentou resultados interessantes: atendeu às características do nível Otimização nas dimensões Produtos e Tecnologias, porém, na dimensão Operações, as características encontradas pertenceram ao nível Controle. Essa situação se deve ao fato de que a empresa recém modificou o foco de suas operações, terceirizando todo o seu setor produtivo, sendo, portanto, responsável apenas pela montagem dos produtos finais. Essa decisão acarretou na necessidade de reestruturação de certos processos e operações, tornando o nível de maturidade desta dimensão inferior às demais.

Figura 3 - Percentagem de maturidade tecnológica por dimensão da empresa Y.



(Fonte: elaborado pelo autor – resultados detalhados no Apêndice).

Assim, a divergência no nível de maturidade entre as dimensões faz com que as recomendações de tecnologias da Indústria 4.0 para a empresa Y tenham focos diferentes de acordo com a dimensão analisada. Como indicado no item 3.5.5, as soluções para as empresas classificadas no nível Otimização devem focar em tecnologias pertencentes aos grupos de Análise e Processamento de Dados, IoT e CPS. Entretanto, tal divergência pode ser vista de maneira análoga a um gargalo em uma linha de produção. Nesse sentido, pela inferioridade tecnológica apresentada na dimensão Operações, esta atua como um ‘gargalo tecnológico’ para implementação de novas tecnologias nas demais dimensões. Desta forma, as recomendações para implementação de tecnologias 4.0 para a empresa Y devem focar primeiramente na dimensão de menor maturidade tecnológica: a dimensão Operações.

Como apresentado na Figura 3, a dimensão Operações está classificada dentro do nível de maturidade Controle, em que a principal recomendação é a implementação das tecnologias referentes aos sistemas ciberfísicos (conforme apresentado no item 3.5.5). Essa tecnologia tem como principal campo de aplicação os sistemas produtivos caracterizados pela montagem de produtos, em que o planejamento e controle da produção necessita considerar uma quantidade maior de fatores em relação às linhas de produção convencionais, coordenando uma grande quantidade de processos técnicos, mecânicos e digitais com estoques limitados e tolerâncias mínimas nos tempos de processo (HOSKE, 2015). Nesse sentido, uma das tecnologias CPS que ganha atenção especial nos setores de montagem é a *Autonomously Guided Workpieces (AGW)*, que consiste de carrinhos autônomos que carregam as peças, ferramentas e materiais necessários ao longo das linhas de montagem, para que os funcionários possam concentrar seus esforços apenas nas atividades específicas de montagem. Cada peça é rotulada e monitorada eletronicamente para garantir que nenhum carro chegue ao final da linha de montagem com, por exemplo, um parafuso que deveria ter sido colocado anteriormente. Ainda, no final de cada etapa de montagem, uma verificação digital garante que o carro está pronto para seguir para o próximo caminho da sua rota. Essa solução atua diretamente no aprimoramento do controle da produção, uma vez que o gerenciamento dos recursos materiais utilizados na montagem dos produtos seria completamente confiável e livre de erros humanos.

Por fim, a completa terceirização do setor produtivo ainda acarretou em diversos problemas com os fornecedores da empresa Y – além de aumentar a quantidade de pedidos para cada fornecedor, ao incrementar novas etapas na produção dos fornecedores que até então não eram necessárias, a complexidade de cada pedido também aumentou. Essa mudança gerou diversos atrasos na entrega de peças fornecidas por terceiros. Assim, uma das recomendações para aprimorar o controle sobre o fornecimento das peças para a montagem final do produto é expandir o compartilhamento de informações integradas ao sistema (*SIIS – System-integrated Information Sharing*) horizontal e verticalmente, além de analisar de forma sistemática os potenciais usos para os novos dados coletados a partir da reestruturação das operações. Com isso, as informações sobre o estado atual de fabricação de cada produto ou pedido, bem como imprevistos e alterações no prazo de entrega, poderiam fluir livremente em ambas as direções (empresa Y e seus fornecedores), ficando disponíveis à qualquer momento para serem

analisadas e utilizadas para auxiliar o setor de planejamento e controle da produção na tomada de decisões.

## 5 CONCLUSÃO

A incorporação das tecnologias 4.0 na indústria brasileira será essencial para o seu desenvolvimento interno e deverá provocar mudanças significativas nas relações entre clientes, fornecedores e concorrentes. Esse desenvolvimento interno não será o único fator responsável por tais mudanças, pois, além da pressão competitiva dos concorrentes locais, o avanço da Indústria 4.0 em outros países aumenta ainda mais a pressão competitiva sobre alguns setores da economia brasileira. Entretanto, a ampla oferta de tecnologias no escopo da Indústria 4.0 dificulta a identificação, por parte dos usuários, das formas mais eficientes para atender suas necessidades. Além disso, os complexos modos de funcionamento, assim como o baixo conhecimento sobre as tecnologias digitais e seus benefícios indicam a necessidade de um esforço para disseminação de conhecimento sobre o tema, visto que menos de 2% das empresas brasileiras tem adesão ao conceito da indústria 4.0 (ABDI, 2018).

Desta forma, o objetivo geral deste estudo foi identificar quais as tecnologias e soluções da Indústria 4.0 mais adequadas para serem implementadas de acordo o estado atual de maturidade tecnológica da empresa. Este objetivo foi atendido por meio da elaboração de um modelo de maturidade que propõe o melhor grupo de tecnologias a ser implementado com base no nível de maturidade tecnológica encontrado na empresa. A proposta utilizou como base a literatura existente sobre os modelos de maturidade e casos de sucesso.

Por meio das análises realizadas no item 3.5, conclui-se que existem padrões predeterminados para a aplicação de tecnologias 4.0 em cada nível de maturidade. É importante ressaltar que os resultados encontrados por meio da aplicação deste modelo podem ser utilizados como base para as recomendações iniciais e não limitam a aplicação de outras tecnologias em cada caso. Ou seja, a adoção absoluta destes padrões não garante a aplicação das melhores tecnologias, tornando indispensável a identificação das características e oportunidades específicas em cada aplicação do modelo de acordo com a estratégia da empresa. Além disso, o fato de adquirir uma determinada tecnologia não torna um processo robusto por si só, ou seja, é necessário que a aplicação dessa tecnologia vise incorporar uma prática e não apenas uma solução.

A definição das empresas para a realização do estudo de caso teve como base o contraste aparente entre os níveis de maturidade que seriam encontrados em cada caso, visando a abrangência de partes

distintas do modelo e o enriquecimento do estudo. Este método apontou que a efetividade do modelo é maior em níveis de maturidade intermediários e avançados, visto que as opções de recomendações para os níveis de maturidade iniciais são menores e menos dependentes das estratégias da empresa, sendo, portanto, mais facilmente identificadas sem a necessidade da aplicação de um modelo de maturidade. Neste contexto, um fato interessante pôde ser observado na divergência entre os níveis de maturidade encontrados nas dimensões da empresa Y, onde conclui-se que fábricas que apresentem mudanças bruscas em suas estratégias ou que cresçam de maneira descontrolada e sem planejamento, requeiram maior atenção na identificação do real ponto de atuação para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 (gargalo tecnológico).

Por fim, é importante que o modelo receba informações adicionais para que permaneça a desenvolver-se de maneira contínua. Desta forma, as recomendações para trabalhos futuros baseiam-se na utilização deste estudo para o desenvolvimento de novas práticas e ferramentas que auxiliem as empresas na modelagem concreta da sua transformação para a Indústria 4.0. Isso deve ser feito separadamente para os diferentes setores industriais, a fim de garantir que as recomendações sejam as mais específicas possíveis e reflitam as diferenças existentes entre os setores. Por fim, espera-se também que o estudo gere diálogos com parceiros interessados na pesquisa e desenvolvimento sobre este tema no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ALMADA-LOBO, F. The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). **Journal of Innovation Management**, v. 3, n. 4, p. 17, 2016.
- ALUR, R. Principles of Cyber-Physical Systems. **The MIT Press**, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.
- BAGHERI, B. et al. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. **IFAC-PapersOnLine**, v. 28, n. 3, p. 1622–1627, 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, Oportunidades para Indústria 4.0: aspectos da demanda e oferta no Brasil, 2018.
- CHEN, Y. Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 588–595, 2017.
- DAVIES, R.; COOLE, T.; SMITH, A. ScienceDirect Review of socio-technical considerations to ensure successful implementation of Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 11, n. June, p. 1288–1295, 2017.
- DR. LICHTBLAU, K. et al. Impuls INDUSTRIE 4.0 READINESS. p. 1–76, 2015.
- DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or Hype?. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v.8, n.2, p.56-58, 2014.
- DUONG, T.; FRANK, T. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**, v.83, pp. 121-139, 2016.
- EVANS, P. C.; ANNUNZIATA, M. Industrial internet: pushing the boundaries of minds and machines. **General Eletric**, 2012.
- FEAGIN, J. et al. A Case for the Case Study. **The University of North Carolina Press**, 1991.
- FETTERMANN, D. C.; CAVALCANTE, C. G. S.; ALMEIDA, T. D. How Industry 4.0 contributes with Operation Management, 2018.
- FORD, M. Industry 4.0: Who benefits? **SMT Surface Mount Technology Magazine**, v.30, n.7 , p.52-55, 2015.
- GEISBERGER, E.; BROY, M. AgendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, 2012.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. Atlas, 1991.
- GONZALEZ, G. et al. Early infrastructure of an internet of things in spaces for learning. **Proc. 8th IEEE Int. Conf. Advanced Learning Technologies**, p. 381–383, 2008.

GORECKY, D.; SCHMITT, M.; LOSKYLL, M. Human- machine- interaction in the industry 4.0 era. **IEEE International Conference on Industrial Informatics**, pp.289-294, 2014.

GRUBER, F. E. Industry 4.0: A best practice project of the automotive industry. **Digital Product and Process Development Systems**, pp. 36-40, 2013.

HELU, M. et al. Identifying performance assurance challenges for smart manufacturing. **Manufacturing Letters**, v. 6, p. 1–4, 2015.

HILGER, J. Auto-ID integration: a bridge between worlds. **German Harting Magazine**, pp. 14-15, 2013.

HOSKE, M. T. Industry 4.0 and Internet of Things tools help streamline factory automation. **Control Engineering**, v. 62, n. 2, p. M7–M10, 2015.

HOVARTH PARTNERS MANAGEMENT CONSULTANTS. How Industry 4.0 is changing how we manage value creation, 2015. Disponível em: [https://www.horvath-partners.com/fileadmin/horvath-partners.com/assets/05\\_Media\\_Center/PDFs/englisch/Industry\\_4.0\\_EN\\_we b-g.pdf](https://www.horvath-partners.com/fileadmin/horvath-partners.com/assets/05_Media_Center/PDFs/englisch/Industry_4.0_EN_we b-g.pdf)

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Normas de apresentação tabular, 1993.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. **Final Report of the Industrie 4.0 Working Group**, 2013.

LASI, H.; KEMPER, H. G. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v.4, 2014.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 2015.

LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. **Procedia CIRP** 16, pp. 3–8, 2014.

LEYH, C. et al. SIMMI 4.0: A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0. v. 8, p. 1297–1302, 2016.

LIU, Y. et al. Review on cyber-physical systems. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, vol. 4, no. 1, p. 27–40, 2017.

LONGO, F.; NICOLETTI, E.; PADOVANO, A. Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. **Computers & Industrial Engineering**, v. 113, p. 144–159, 2017.



LOSKEYLL, M. et al. Context-Based Orchestration for Control of Resource-Efficient Manufacturing Processes. **Future Internet**, pp. 737-761, 2012.

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

MANGHARAM, R; PAJIC, M. Distributed Control for Cyber-Physical Systems. **Journal of the Indian Institute of Science: Special Issue on Cyber-Physical Systems**, v. 93, p. 353-388, 2013.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. Unlocking the potential of the internet of things, 2015. Disponível em: <<http://www.mckinsey.com/business-functions/business-technology/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>>.

MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. Towards Lean Production in Industry 4.0. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 466–473, 2017.

MUELLER, E.; CHEN, L.; RIEDEL, R. Challenges and Requirements for the Application of Industry 4.0: A Special Insight with the Usage of Cyber-Physical System. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 30, n. 5, p. 1050–1057, 2017.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Workshop report on foundations for innovation in cyber-physical systems, 2013.

OKS, S, J. Importance of user role concepts for the implementation and operation of service systems based on cyber- physical architectures. **Ininteract 2015**, Chemnitz, Germany, 2015

PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. Aspects of the Research Roadmap in Application Scenarios. 2016.

PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How Smart, Connected Products are Transforming Competition. **Harvard Business Review**, 2015.

PRICEWATERHOUSECOOPERS. Global Industry 4.0 Survey. Industry 4.0: Building the digital enterprise, 2015. Disponível em: <<https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>>.

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

RIZZO, J.; ENDEAVOR. Oportunidades da Indústria 4.0, 2016. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/saiba-o-que-e-a-industria-4.0-e-descubra-as-oportunidades-que-ela-gera,11e01bc9c86f8510VgnVCM1000004c00210aRCRD>>.

ROBLEK, V. et al. A complex view of Industry 4.0, **SAGE Open** 6, v. 2, 2016.

ROCKWELLAUTOMATION. The Connected Enterprise Maturity

Model, 2014. Disponível em: < [http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002_-en-p.pdf)>.

RÜSSMAN, M. et al. Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing. **Boston Consulting**, n. April, p. 1–5, 2015.

SCHMIDT, R. et al. Industry 4.0 potentials for creating smart products: empirical research results. **International Conference on Business Information Systems**, pp. 16-27, 2015.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161–166, 2016.

SCHWAB, K. The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum, 2016.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

THAMES, L.; SCHAEFER, D. Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 12–17, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Biblioteca Universitária. **Trabalho acadêmico: guia fácil para diagramação: formato A5**. Florianópolis, 2009.

UCKELMANN, D. et al. Architecting the Internet of Things, 2011.

VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN UND ANLAGENBAU (VDMA). Industrie 4.0 in practice: Solutions for industrial applications, 2016. Disponível em: <<https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/5356229/Industrie+4.0+in+practice+2016/7fa35030-9456-4de4-8f55-fbd7380d8cf4>>.

WEYER, S.; SCHMITT, M.; OHMER, M.; GORECKY, D. Towards Industry 4.0: Standardization as the Crucial Challenge for Highly Modular, Multi-vendor Production Systems. **IFAC-PapersOnLine**, pp. 579-584, 2015.

ZHONG, R. Y. et al. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017.

## APÊNDICE A

Tabela 18 - Relação de casos e usos das tecnologias

	APD	RA	CN	DM	IOT	MA	CPS	Nível
C1	0	0	0	0	1	0	1	Automação
C2	0	0	1	1	0	0	0	Monitoramento
C3	1	0	0	0	1	0	0	Otimização
C4	0	0	1	0	1	0	0	Monitoramento
C5	0	0	1	0	1	0	0	Controle
C6	0	0	0	0	1	0	1	Monitoramento
C7	0	0	0	0	1	0	1	Monitoramento
C8	0	0	0	0	1	0	1	Controle
C9	0	0	0	0	1	0	1	Otimização
C10	1	0	1	0	1	0	0	Otimização
C11	0	1	0	0	1	0	0	Controle
C12	0	1	0	1	0	0	0	Controle
C13	0	1	0	0	0	0	0	Monitoramento
C14	0	0	0	0	0	0	1	Controle
C15	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C16	0	0	0	0	1	0	1	Monitoramento
C17	0	0	0	0	1	0	1	Otimização
C18	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C19	1	0	0	0	1	0	1	Otimização
C20	0	0	0	0	1	0	1	Monitoramento
C21	1	0	0	0	0	0	1	Otimização
C22	0	1	0	0	1	0	0	Monitoramento
C23	1	0	0	0	0	0	0	Monitoramento
C24	1	0	0	0	0	0	0	Monitoramento
C25	1	0	0	0	0	0	0	Otimização
C26	0	1	0	0	1	0	0	Monitoramento
C27	1	0	1	0	0	0	0	Otimização
C28	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C29	0	0	0	0	0	0	1	Controle
C30	0	0	0	0	1	0	0	Controle
C31	1	0	0	0	1	0	0	Otimização
C32	1	0	0	0	1	0	0	Otimização
C33	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C34	0	0	0	0	0	0	1	Monitoramento
C35	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C36	0	0	0	1	1	0	0	Monitoramento
C37	0	1	0	1	1	0	1	Monitoramento
C38	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento

C39	0	0	1	0	1	0	0	Monitoramento
C40	0	1	0	1	0	0	0	Monitoramento
C41	1	0	0	0	1	0	0	Otimização
C42	1	0	0	1	0	0	0	Monitoramento
C43	0	0	0	1	1	0	0	Monitoramento
C44	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C45	0	0	0	0	0	0	1	Controle
C46	1	0	0	0	0	0	0	Monitoramento
C47	0	1	0	0	1	0	0	Monitoramento
C48	0	0	0	1	1	0	0	Monitoramento
C49	1	0	0	0	0	0	0	Monitoramento
C50	0	0	0	0	1	0	1	Monitoramento
C51	0	0	0	1	1	0	0	Monitoramento
C52	0	1	0	0	1	0	0	Monitoramento
C53	0	0	0	1	1	0	0	Monitoramento
C54	0	0	0	0	0	0	1	Automação
C55	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C56	0	0	0	0	0	0	1	Controle
C57	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C58	0	0	0	0	0	0	1	Controle
C59	0	0	0	0	1	0	1	Controle
C60	0	0	0	0	1	0	0	Monitoramento
C61	0	0	0	0	1	0	1	Automação
C62	1	0	0	0	0	0	0	Monitoramento
C63	0	0	0	0	1	0	0	Automação
C64	0	0	0	1	1	0	1	Controle
C65	1	0	0	0	1	0	1	Automação
C66	1	0	0	1	0	0	0	Monitoramento
C67	0	0	0	0	1	0	1	Monitoramento
C68	0	0	0	0	1	0	1	Monitoramento
C69	0	0	1	1	0	0	0	Controle
C70	0	0	1	0	0	0	0	Monitoramento
C71	1	0	0	0	1	0	1	Automação
C72	0	0	0	0	1	0	1	Otimização
C73	1	0	0	0	0	1	0	Automação
C74	0	0	0	1	1	0	1	Controle
C75	0	0	0		1	0	0	Controle
C76	0	0	0	1	1	0	0	Monitoramento

Legenda: APD – Análise e Processamento de Dados; RA – Realidade Aumentada; CN – Computação em Nível; DM – Dispositivos Móveis; IoT – Internet of Things; MA – Manufatura Aditiva; CPS – Cyber Physical Systems.

Tabela 19 - Descrição dos casos aplicados em cada empresa

<b>Empresa</b>	<b>Descrição do caso</b>	<b>Fonte</b>
ABB	Automação da linha de produção através do uso de robôs.	VDMA
ABB	Uso da Realidade Aumentada para acessar informações sobre a manutenção via tablets.	Hovarth Partners
ACS Automotive Center	Uso de Machine Learning no processo de manufatura para aumentar a produtividade.	D.C. Fettermann
Audi	Uso de sistemas de Realidade Aumentada para o monitoramento de atividades de montagem.	D.C. Fettermann
Balluff	Integração da produção através de ERP's, MES's e RFID.	VDMA
Bayer	Prevenção de erros e realização de diagnósticos através do uso de medias.	Hovarth Partners
Bender	Integração de ERP's para o monitoramento contínuo do processo de manufatura.	D.C. Fettermann
BeR	Integração da comunicação entre células da linha de produção através de softwares.	VDMA
BMW	Interconexão entre P&D e produção.	Hovarth Partners
Bosch	Monitoramento e processamento de dados referentes à qualidade dos produtos.	VDMA
Bosch Packaging	Automação modular para empacotamento.	D.C. Fettermann
Centigrade	Uso da Realidade Aumentada para controlar processos.	VDMA
Centrum	Uso da Realidade Aumentada para monitorar o processo de montagem.	VDMA
CHT	Monitoramento e controle do processo de manufatura.	D.C. Fettermann
CNH Industrial N.V.	Monitoramento da frota de veículos.	D.C. Fettermann
Cosel	Monitoramento do processo de manufatura para aprimorar sua eficiência.	D.C. Fettermann
Daimler	Otimização do fluxo de produção através da rastreabilidade.	Hovarth Partners
De Walt	Monitoramento de equipamentos e baterias via comunicação Bluetooth.	D.C. Fettermann
DMG Mori Seiki	Uso da simulação de processos no planejamento da produção.	Hovarth Partners
EUCHNER	Interconexão sensorial do chão-de-fábrica.	Hovarth Partners
Festo	Flexibilização modular da produção utilizando a capacidade ótima.	Hovarth Partners
Fraunhofer IWU e iMain	Manutenção inteligente de máquinas.	D.C. Fettermann
Fraunhofer-Institut (IPA)	Inclusão e conexão de clientes na cadeia de valor da empresa.	Hovarth Partners
Fraunhofer-Institut (IPA)	Realização de Upcycling através da coleta de dados de produtos e materiais.	Hovarth Partners
Fraunhofer-Institut (IPA)	Flexibilização modular da produção utilizando capacidade ótima.	Hovarth Partners
Fujitsu	Uso da Computação de Nuvem para o monitoramento de	D.C.

	processos e produtos.	Fettermann
GE Digital	Uso de Data Analytics na nuvem para adquirir informações sobre a eficiência da produção.	VDMA
Gifu Tada Seiki	Monitoramento de processos para aprimorar a qualidade do produto.	D.C. Fettermann
Harley-Davidson	Criação de um sistema para monitoramento e controle do processo produtivo.	D.C. Fettermann
HARTING Technologie-gruppe	Integração vertical da empresa.	Hovarth Partners
HBM	Automação do sistema de Medidas e Qualidade.	D.C. Fettermann
Heidelberg	Uso de Data Analytics para aumentar a disponibilidade das máquinas.	VDMA
Heidelberger Druckmaschinen	Monitoramento da operação de dispositivos.	D.C. Fettermann
Hitach	Criação de sistemas de manufatura utilizando robôs.	D.C. Fettermann
Hologram	Identificação de produtos através de RFID.	VDMA
Humanitarian Logistics Organisation (HLO)	Monitoramento do fluxo de materiais logísticos durante o processo de distribuição.	D.C. Fettermann
IHI	Monitoramento e compartilhamento de informações relativas ao processo de manufatura.	D.C. Fettermann
Inblay Technology	Monitoramento das condições de temperatura e vibração de motores.	D.C. Fettermann
Informantis	Uso de <i>wearables</i> inteligentes para situações de perigo na fábrica.	D.C. Fettermann
JIN	Uso de Realidade Aumentada para aprimoramento da segurança dos trabalhadores.	D.C. Fettermann
Komet	Uso da tecnologia ToolScope para monitorar e adaptar as máquinas quando necessário.	VDMA
KSB	Uso de App's para monitorar possíveis vazamentos de energia dentro de tubulações.	VDMA
Kubota	Criação de um sistema para monitoramento de agricultura.	D.C. Fettermann
Lenze	Gerenciamento dos dados de produtos no seu ciclo de vida.	D.C. Fettermann
Maschinenfabrik Reinhausen	Criação de MES's	Hovarth Partners
Mazda	Integração do sistema de dados referentes a produtos, máquinas e clientes, processados na nuvem.	D.C. Fettermann
Mitsubishi electric corporation	Compartilhamento de informações referentes ao processo de manufatura para aprimoramento da gestão de operações.	D.C. Fettermann
Nakamura-Tome Precision Industry	Integração do monitoramento da eficiência do processo de manufatura.	D.C. Fettermann

NEC	Previsão de vendas e gestão de estoques.	D.C. Fettermann
No name	Monitoramento de peças durante o ciclo de produção.	D.C. Fettermann
Orbotech	Monitoramento dos processos de controle e de manufatura.	D.C. Fettermann
Paltek	Segurança dos sistemas de transmissão de dados entre dispositivos e máquinas.	D.C. Fettermann
Parker	Uso de sensores na manutenção da condição dos produtos.	VDMA
pi4	Criação de workerbots - robôs que auxiliam nas linhas de produção.	VDMA
Polibol	Monitoramento das condições do chão de fábrica para segurança dos operadores.	D.C. Fettermann
Ruch NovaPlast	Monitoramento e controle dos processos de manufatura.	D.C. Fettermann
Sanyo denki	Criação de um sistema integrado de instruções de trabalho disponíveis no chão de fábrica.	D.C. Fettermann
SAP	Digitalização dos processos de manufatura.	VDMA
Schunk	Instalação de componentes modulares no processo de montagem.	VDMA
Sick	Mapeamento do estado da produção através de sensores RFID.	VDMA
Siemens	Utilização de soluções de automação (robótica) na produção.	Hovarth Partners
Siemens	Utilização de dados da produção para auxílio na tomada de decisão.	Hovarth Partners
Stanley Black & Decker	Monitoramento de níveis de estoque, movimentação de materiais e entrega de produtos.	D.C. Fettermann
Thyssenkrupp	Gerenciamento de dados dos produtos ao longo do seu ciclo de vida.	D.C. Fettermann
Trumpf	Inclusão dos sistemas da produção nas cadeias de valor.	Hovarth Partners
Trumpf	Digitalização de dados relevantes para a produção com acesso online.	Hovarth Partners
Trumpf	Monitoramento da manutenção via internet.	Hovarth Partners
Voith Turbo	Integração de ERP's para monitorar o processo de manufatura.	D.C. Fettermann
Volkswagen	Inclusão do uso de smart-glasses aos operadores da produção.	Hovarth Partners
Volkswagen	Uso da Realidade Aumentada para escolha de materiais de produção.	D.C. Fettermann
Weidmüller Interface	Auto-otimização de processos modulares.	Hovarth Partners
Weidmüller Interface	Uso de soluções de automação na produção.	Hovarth Partners
Wittenstein	Gerenciamento do desempenho da produção.	Hovarth Partners
Wittenstein	Gerenciamento da produção via mobile.	Hovarth Partners
Wolffkran	Uso de Machine Learning em guindastes.	D.C.

		Fettermann
Würth	Descentralização de dados da produção.	Hovarth Partners

Tabela 20 - Diagnóstico da empresa X (Estruturação)

Estruturação	
Produtos	<b>1. Produtos não coletam dados e não possuem funcionalidades de TI;</b> <b>2. As etapas de desenvolvimento do produto não têm suporte de ferramentas digitais;</b>
Operações	<b>3. As etapas da produção não tem suporte de SGEs;</b> <b>4. A integração de SGEs é presente apenas nos setores administrativos;</b> 5. O compartilhamento de informações não é integrado aos sistemas da empresa;
Tecnologias	6. As máquinas não coletam dados e não podem ser aprimoradas; <b>7. Não há integração entre máquinas (M2M integration);</b> <b>8. A infraestrutura do sistema de produção (máquinas, processos) não é capaz de ser controlada por TI;</b> <b>9. O uso de tecnologias de nuvem é inexistente;</b> <b>10. A segurança das tecnologias de informação é inexistente;</b>

Legenda: em **negrito** – características encontradas.

Tabela 21 - Diagnóstico da empresa X (Monitoramento)

Monitoramento	
Produtos	11. Os primeiros sinais de funcionalidades de TI nos produtos podem ser encontrados; 12. Os produtos são capazes de coletar dados referentes ao seu entorno.
Operações	<b>13. A empresa dá os primeiros passos em direção à integração do compartilhamento de dados e informações aos sistemas de TI;</b> 14. Os principais processos de negócio da empresa são suportados por sistemas de TI (SGEs); 15. As principais etapas do processo produtivo são monitoradas por sistemas de TI (SGEs), porém não são otimizadas;
Tecnologias	<b>16. Algumas máquinas e equipamentos são capazes de coletar dados sobre a manufatura;</b> 17. Algumas máquinas e equipamentos podem ser controlados por TI, são interoperáveis ou possuem capacidade de comunicação <i>Machine-2-Machine (M2M)</i> ; 18. As soluções de segurança de TI da empresa encontram-se na fase de planejamento; 19. O uso de tecnologias de nuvem ainda é inexistente; e 20. A confidencialidade, integridade e disposição de dados à qualquer momento não pode ser garantida.

Legenda: em **negrito** – características encontradas.

Tabela 22 - Diagnóstico da empresa Y (Controle)

Controle	
Produtos	21. Os produtos contendo as funcionalidades de TI são lançados no mercado; 22. A análise e processamento de dados coletados a partir das funcionalidades de TI dos produtos é praticamente inexistente (0-20% dos dados coletados são analisados);
Operações	<b>23. O compartilhamento de dados e informações entre departamentos é parcialmente automatizado;</b>



	<p><b>24. Os principais setores da empresa são suportados por sistemas de TI (SGEs);</b></p> <p><b>25. A maioria das etapas do processo de fabricação são suportadas pelos SGEs e suas informações podem ser manualmente encaminhadas para as etapas anteriores e seguintes;</b></p> <p><b>26. A integração de sistemas entre a empresa e seus parceiros externos (redes de valor) existe, mas é limitada;</b></p> <p><b>27. São dados os primeiros passos para a criação de um modelo digital da fábrica (<i>digital modelling</i>);</b></p>
Tecnologias	<p>28. As máquinas produzem dados da produção, mas sua coleta é manual;</p> <p>29. A empresa conta com sistemas produtivos que podem ser controlados por TI, são interoperáveis ou possuem capacidade de comunicação <i>Machine-2-Machine (M2M)</i> ou <i>Machine-2-Cloud-2-Machine (MCM)</i>;</p> <p>30. Algumas máquinas e/ou sistemas produtivos da empresa possuem capacidade de aprimoramento;</p> <p>31. O compartilhamento de informações internas da empresa acontece pela nuvem;</p> <p>32. É possível acessar os dados da produção através de dispositivos móveis;</p> <p>33. Múltiplas soluções de segurança de TI estão em desenvolvimento;</p> <p>34. O acesso aos dados internos da empresa é protegido continuamente contra invasões externas, além de serem transmitidos em estado criptografado; e</p> <p>35. A confidencialidade, disponibilidade e integridade dos dados da empresa são totalmente garantidas.</p>

Legenda: em **negrito** – características encontradas.

Tabela 23 - Diagnóstico da empresa Y (Otimização)

<b>Otimização</b>	
Produtos	<p><b>36. Os produtos da empresa contam com várias funcionalidades de TI;</b></p> <p><b>37. A análise e processamento dos dados coletados via sensores é realizada com frequência.</b></p>
Operações	<p>38. O compartilhamento de dados e informações entre departamentos é automatizado;</p> <p>39. O compartilhamento de dados e informações entre as etapas do processo produtivo é automatizado;</p> <p>40. Os sistemas de TI suportam todos os processos de produção e coletam deles grandes quantidades de dados que posteriormente são utilizados para otimizações;</p> <p>41. Os SGEs da empresa integram informações de parceiros externos;</p> <p>42. Os principais processos da empresa possuem representação através de um modelo virtual;</p>
Tecnologias	<p><b>43. Os dados interempresariais são criptografados;</b></p> <p><b>44. As soluções de segurança de TI já foram completamente implementadas;</b></p>

Legenda: em **negrito** – características encontradas.