

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**JULIANO ENDRIGO SORDAN**

**ANÁLISE DOS PONTOS DE CONVERGÊNCIA ENTRE TECNOLOGIAS DA  
INDÚSTRIA 4.0 E PRÁTICAS LEAN SEIS SIGMA EM PROCESSOS  
DE MANUFATURA: UM ESTUDO MULTICASOS**

**SÃO CARLOS  
2020**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JULIANO ENDRIGO SORDAN

**ANÁLISE DOS PONTOS DE CONVERGÊNCIA ENTRE TECNOLOGIAS DA  
INDÚSTRIA 4.0 E PRÁTICAS LEAN SEIS SIGMA EM PROCESSOS  
DE MANUFATURA: UM ESTUDO MULTICASOS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão da Qualidade  
Orientação: Prof. Dr. Pedro Carlos Oprime  
Co-orientação: Prof. Dr. Marcio Lopes Pimenta

São Carlos  
2020

## FICHA CATALOGRÁFICA



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Juliano Endrigo Sordan, realizada em 21/08/2020.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Pedro Carlos Oprime (UFSCar)

Prof. Dr. Sergio Luis da Silva (UFSCar)

Prof. Dr. Márcio Lopes Pimenta (UFU)

Prof. Dr. Glauco Henrique de Sousa Mendes (UFSCar)

Prof. Dr. Daniel Jugend (UNESP)

Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González (UFRN)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Dedico este trabalho aos meus avôs  
Bernardino Vasconcellos (*in memoriam*) e  
João Soldan (*in memoriam*)

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder saúde e iluminar o meu caminho nesta jornada.

A minha família pelo apoio e incentivo.

Ao meu orientador professor Dr. Pedro Carlos Oprime pela confiança e incentivo durante a minha trajetória acadêmica. Obrigado por compartilhar sua experiência e sabedoria.

Ao meu co-orientador prof. Dr. Marcio Lopes Pimenta por toda a sua dedicação e pelas valiosas recomendações que enriqueceram a construção desta tese.

Ao Departamento de Engenharia de Produção (*Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione - Digep*) do *Politecnico di Torino* (PoliTo) pela oportunidade que me foi dada para atuar como professor visitante e pesquisador (Contrato n.6/2018/Digep).

Aos professores do PoliTo Franco Lombardi e Paolo Chiabert pela receptividade e companheirismo durante toda a minha estadia na Itália.

Aos professores membros das comissões julgadoras dos exames de qualificação e defesa, Daniel Jugend, Glauco Henrique de Souza Mendes, Lara Bartocci Liboni, Mario Orestes Aguirre Gonzalez e Sergio Luis da Silva, pelas importantes contribuições.

Aos colaboradores e gestores das empresas avaliadas pela solicitude e atenção durante a realização desta pesquisa.

Aos colaboradores e professores do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (DEP) da UFSCar, pelo suporte e atenção.

À agência de fomento CNPQ, pelo apoio nos projetos 407896/2018 e 314095/2018-7.

Aos professores e amigos da Fatec Sertãozinho, Mauricio Angeloni, Mara Jabur, Evaldo Ferezin e Clesio Marinho por me apoiarem durante o período em que estive no exterior.

A todos os amigos verdadeiros que torceram por mim e que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

*“Conte o que pode ser contado,  
meça o que é possível medir, e  
o que não puder ser medido,  
torne mensurável”*

*(Galileu Galilei)*

## RESUMO

O referencial teórico a respeito das práticas de excelência operacional reconhece que a abordagem Lean Seis Sigma é capaz de promover a melhoria contínua dos processos empresariais em termos de qualidade, custo e velocidade. Por outro lado, o recente paradigma da Indústria 4.0 vem criando desafios e oportunidades referente a adoção de tecnologias digitais nos processos de manufatura e conectando o mundo físico ao mundo virtual por meio de Sistemas Ciber-Físicos. Embora seja possível evidenciar na literatura estudos que integram práticas isoladas *Lean Manufacturing* ou Seis Sigma com tecnologias específicas da Indústria 4.0, a integração sistêmica entre esses elementos ainda representa uma importante lacuna teórica. Esta tese tem por objetivo analisar os pontos de convergência entre tecnologias da Indústria 4.0 e práticas Lean Seis Sigma em processos de manufatura. Para isso, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura que permitiu a identificação de treze pontos de convergência e resultou na elaboração de uma estrutura de análise de pesquisa conceitual. Tal estrutura reúne cinco categorias de análise diretamente relacionadas às questões de pesquisa: pontos de convergência, requisitos de tecnologia da informação, requisitos de automação, requisitos de competências e resultados. Com o propósito de validar essa estrutura foi conduzido um estudo multicase envolvendo duas empresas do seguimento de fabricação de veículos automotores, com experiência nas práticas Lean Seis Sigma, cujos processos de manufatura demonstraram evidências de conversão para o modelo de Indústria 4.0. A abordagem de pesquisa recorreu a técnicas qualitativas e quantitativas e viabilizou a mensuração a respeito das percepções dos entrevistados, assim como a análise dos documentos internos e observações *in loco*. As evidências empíricas destacaram os pontos de contato mais expressivos nessas organizações e permitiram o estabelecimento de proposições teóricas. Como contribuição prática, este estudo poderá auxiliar o desenvolvimento de estratégias de transformação digital no âmbito das iniciativas de excelência operacional.

**Palavras-chave:** Lean Seis Sigma. Indústria 4.0. Excelência Operacional. Estudo de Caso.

## ABSTRACT

The literature on operational excellence recognizes that the Lean Six Sigma approach can promote the continuous improvement of business processes in terms of quality, cost, and speed. On the other hand, the recent paradigm of Industry 4.0 has been creating challenges and opportunities regarding the adoption of digital technologies in manufacturing processes and connecting the physical world to the virtual world through Cyber-physical Systems. Although the literature presents studies that integrate practices isolated from Lean Manufacturing or Six Sigma approaches with specific technologies from Industry 4.0, the systemic integration between these elements still represents an important theoretical gap. This thesis aims to analyze the points of convergence between technologies of industry 4.0 and Lean Six Sigma practices in manufacturing processes. To this end, a systematic literature review was carried out, giving rise to a conceptual research analysis structure that brings together thirteen points of convergence. This structure covers five categories of analysis directly related to research questions: points of convergence, information technology requirements, automation requirements, competence requirements, and results. In order to validate this structure, a multi-case study was conducted involving two companies in the automotive sector, with experience in Lean Six Sigma practices, whose manufacturing processes demonstrated evidence of conversion to the Industry 4.0 model. The research approach combined qualitative and quantitative techniques and made it possible to measure the perceptions of interviewees, as well as the analysis of internal documents and on-site observations. The empirical evidence highlighted the most expressive points of contact in these organizations and allowed the establishment of theoretical propositions. As a practical contribution, this study may assist in development of digital transformation strategies within the scope of operational excellence initiatives.

**Keywords:** Lean Six Sigma. Industry 4.0. Operational Excellence. Case Study.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do referencial teórico.....	21
Figura 2 - Definição da Motorola para o conceito Seis Sigma.....	24
Figura 3 - Ferramentas comuns à abordagem LSS.....	28
Figura 4 - Objetivos, ferramentas e técnicas aplicadas nas fases DMAIC.....	29
Figura 5 - Evolução dos paradigmas industriais.....	34
Figura 6 - As nove tecnologias da Indústria 4.0.....	35
Figura 7 - Método do Estudo de caso.....	52
Figura 8 - Análise de estudo de caso múltiplo.....	60
Figura 9 - Perspectiva de processos em projetos LSS.....	72
Figura 10 - Estrutura de análise da pesquisa.....	75
Figura 11 - Os dez pilares da Indústria 4.0.....	79
Figura 12 - Mapa conceitual da Empresa A.....	92
Figura 13 - Mapa conceitual da Empresa B.....	105
Figura 14 - Rede entre os componentes da estrutura de análise da pesquisa evidenciados ...	109
Figura 15 - Gráfico BoxPlot para os valores observados nos 13 PCs.....	113
Figura 16 - Gráfico dos escores dos dois primeiros componentes principais.....	115
Figura 17 - Estrutura de análise final para o estudo multicasos.....	119

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Aspectos humanos e técnicos da melhoria.....	25
Quadro 2 - Resultados decorrentes dos projetos LSS .....	30
Quadro 3 - Pontos de convergência entre tecnologias I4.0 e práticas LSS .....	66
Quadro 4 - Síntese dos pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e práticas LSS .....	73
Quadro 5 - Perfil dos entrevistados na Empresa A.....	77
Quadro 6 - Nível de automação na Empresa A .....	88
Quadro 7 - Categorias e componentes estruturais na Empresa A.....	91
Quadro 8 - Perfil dos entrevistados na Empresa B.....	94
Quadro 9 - Nível de automação na Empresa B .....	101
Quadro 10 - Categorias e componentes estruturais na Empresa B.....	104
Quadro 11 - Categorias e componentes da estrutura de análise de pesquisa (Intercasos).....	107

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Percepção dos entrevistados quanto ao uso das tecnologias I4.0 na Empresa A ....	81
Tabela 2 - Percepção dos entrevistados quanto aos PCs na Empresa A.....	82
Tabela 3 - Percepção dos entrevistados quanto ao uso das tecnologias I4.0 na Empresa B ....	95
Tabela 4 - Percepção dos entrevistados quanto aos PCs na Empresa B.....	96
Tabela 5 – Resultados do Teste de Mann-Whitney .....	111
Tabela 6 - Autovalores e proporção da variância dos Componentes Principais .....	114
Tabela 7 - Contribuição dos PCs para a formação dos Componentes Principais.....	114

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

I4.0 – Indústria 4.0  
ABB - Asea Brown Boveri *Group*  
ACP – Análise dos Componentes Principais  
AE01 – Analista Executivo na Empresa 1  
AE02 – Assistente Executivo na Empresa 1  
AE03 – Assistente de Engenharia na Empresa 2  
AGV – *Automated Guided Vehicle*  
AIV – *Autonomous Intelligent Vehicle*  
AM01 – Analista de Manutenção Sênior na Empresa 2  
ANOVA – Análise de Variância  
AP01 – Analista Técnico de Produção na Empresa 1  
AP02 – Assistente de Produção na Empresa 2  
APQP – Planejamento Avançado da Qualidade do Produto  
AQ01 – Analista da Qualidade na Empresa 2  
AQ02 – Analista da Qualidade na Empresa 2  
AT01 – Analista de Treinamento na Empresa 1  
AT02 – Analista de Treinamento na Empresa 1  
ASQ – *American Society for Quality*  
BB – *Black Belt*  
BCG - Boston Consulting *Group*  
CAD - *Computer-aided Design*  
CAM - *Computer-aided Manufacturing*  
CAPEX - *CAPital Expenditure*  
CCD – Cartão de Comunicação Direta  
CIM - *Computer-integrated Manufacturing*  
CEP – Controle Estatístico de Processo  
CLP – Controlador Lógico Programável  
CMM - Máquinas de Medição por Coordenadas  
CNAE - Classificação Nacional de Atividades Econômicas  
CNC – Comando Numérico por Computador  
COBOT – Robô Colaborativo  
CPS – *Cyber-Physical System*  
CTQ – *Critical to Quality*  
DFSS – *Design for Lean Six Sigma*  
DGQ - *Deutsche Gesellschaft für Qualität*  
DM01 – Desenvolvedor MES na Empresa 2  
DMAIC – *Define, Measure, Analyze, Improve, Control*  
DMADV – *Define, Measure, Analyze, Design, Verify*  
DO01 – Diretor de Operações na Empresa 1  
DOE - *Design of Experiments*  
DPMO – Defeitos por Milhão de Oportunidades

DT01 – Diretor de Tecnologia na Empresa 2  
EAID - *Egocentric Attention-interaction Documentation*  
EPI – Equipamento de Proteção Individual  
ERP - *Enterprise Resource Planning*  
FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*  
FMS - *Flexible Manufacturing System*  
GB – *Green Belt*  
GQ01 – Gerente de Qualidade na Empresa 1  
GL01 – Gerente de Planejamento Logístico na Empresa 1  
GM01 – Gerente de Manutenção na Empresa 1  
GO01 – Gerente de Otimização na Empresa 1  
GP01 – Gerente de Produção na Empresa 1  
GP02 – Gerente de Engenharia de Processos e Qualidade na Empresa 2  
GS01 – Gerente de Operações Sênior na Empresa 1  
HMD - *Head-Mounted Displays*  
IBM - *International Business Machines Corporation*  
IEC - *International Electrotechnical Commission*  
IFaCOM - *Intelligent Fault Correction and Self-Optimising Manufacturing Systems*  
IoT – *Internet of Things*  
IIoT – *Industrial Internet of Things*  
IHM – Interação Homem-Máquina  
IP – Protocolo de Internet  
ISO - *International Organization for Standardization*  
KPI - *Key Performance Indicator*  
LIE – Limite Inferior de Especificação  
LSE – Limite Superior de Especificação  
LSS – *Lean Seis Sigma*  
LP – *Lean Practitioner*  
M2M - *Machine to Machine*  
MES - *Manufacturing Execution System*  
MBB – *Master Black Belt*  
MIFC – *Material Information Flow Chart*  
MIT - *Massachusetts Institute of Technology*  
MSA - *Measurement Systems Analysis*  
MTBF - *Mean Time Between Failures*  
MTTR - *Mean Time to Repair*  
OEE - *Overall Equipment Effectiveness*  
OLAP - *Online Analytic Processing*  
OPEX - *Operational EXpenditure*  
PC – Ponto de Convergência  
PDCA - *Plan-Do-Check-Act*  
PL01 – Planejadora na Empresa 1  
PL02 – Planejador Logístico na Empresa 1  
PLC – Controlador Lógico Programável

PoC – *Proof of Concept*

PPAP – *Processo de Aprovação da Peça de Produção*

QFD - *Quality Function Deployment*

RAMI 4.0 - *Reference Architecture Model Industrie 4.0*

RFID - *Radio-Frequency Identification*

RSL – *Revisão Sistemática da Literatura*

RTY - *Rolled Throughput Yield*

SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*

SIMMI - *System Integration Maturity Model Industry 4.0*

SIPOC - *Supplier-Input-Process-Output-Customer*

SMED - *Single Minute Exchange of Die*

STP – *Sistema Toyota de Produção*

TI – *Tecnologia da Informação*

TOS - *Truck Operating System*

TPM - *Total Productive Maintenance*

VSM - *Value Stream Mapping*

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO TEMA.....	14
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ABORDAGEM LEAN SIX SIGMA.....	16
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS DE PESQUISA.....	18
1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	19
1.5 ESTRUTURA DA TESE .....	20
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
2.1 ABORDAGEM LEAN SEIS SIGMA.....	22
2.1.1 Origem e Evolução da Abordagem Lean Seis Sigma.....	22
2.1.2 Abordagem orientada para projetos.....	24
2.1.3 Método DMAIC, Principais Ferramentas, Técnicas e Resultados .....	28
2.2 INDÚSTRIA 4.0.....	31
2.2.1 Origem e Evolução do termo Indústria 4.0.....	31
2.2.2 Tecnologias Habilitadoras .....	35
2.2.2.1 Big Data Analytics .....	36
2.2.2.2 Robótica Avançada .....	37
2.2.2.3 Simulação .....	38
2.2.2.4 Integração Vertical e Horizontal .....	39
2.2.2.5 Cibersegurança .....	41
2.2.2.6 Computação em Nuvem .....	41
2.2.2.7 Manufatura Aditiva .....	42
2.2.2.8 Realidade Aumentada .....	43
2.2.3 Especificidades da Indústria 4.0 .....	44
<b>3 ASPECTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>49</b>
3.1 CONCEPÇÃO METODOLÓGICA E ABORDAGEM DE PESQUISA .....	49
3.2 MÉTODO DE PESQUISA.....	50
3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura .....	53
3.2.2 Protocolo de Pesquisa .....	54
3.2.3 Seleção de Casos e Unidades de Análise.....	54
3.2.4 Qualidade do Projeto de Pesquisa.....	57

3.2.5	Coleta de Dados .....	58
3.2.6	Análise de Dados .....	59
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
4.1	PONTOS DE CONVERGÊNCIA E ESTRUTURA DE ANÁLISE DA PESQUISA ..	62
4.2	EMPRESA A.....	76
4.2.1	Análise dos resultados na Empresa A.....	77
4.2.1.1	Caracterização do processo e cultura LSS na Empresa A.....	78
4.2.1.2	Tecnologias I4.0 da Empresa A .....	79
4.2.1.3	Pontos de convergência evidenciados na Empresa A .....	81
4.2.1.4	Requisitos técnicos e resultados da Empresa A .....	87
4.3	EMPRESA B .....	93
4.3.1	Análise dos resultados na Empresa B.....	93
4.3.1.1	Caracterização do processo e cultura LSS na Empresa B .....	94
4.3.1.2	Tecnologias I4.0 na Empresa B.....	94
4.3.1.3	Pontos de convergência da Empresa B .....	96
4.3.1.4	Requisitos técnicos e resultados da Empresa B .....	100
4.4	ANÁLISE INTERCASOS.....	106
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>116</b>
5.1	ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS .....	116
5.2	IMPLICAÇÕES TEÓRICAS .....	119
5.3	IMPLICAÇÕES GERENCIAIS .....	124
5.4	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	126
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>128</b>
	<b>APENDICE A: PROTOCOLO DE ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>142</b>
	<b>APENDICE B: ROTEIRO DE ENTREVISTA.....</b>	<b>145</b>
	<b>APENDICE C: DADOS USADOS NA ACP .....</b>	<b>150</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nesta seção apresenta-se a caracterização do tema “Indústria 4.0” (I4.0) e o posicionamento da abordagem Lean Seis Sigma (LSS) frente ao novo paradigma industrial. Apresentam-se também os problemas e objetivos de pesquisa que norteiam a construção desta tese, assim como a justificativa e relevância para a realização da pesquisa e, por fim, a estrutura do trabalho.

## 1.1 CARACTERIZAÇÃO DO TEMA

Desde o início da industrialização no século XVIII, avanços tecnológicos têm alterado significativamente o *modus operandi* dos processos de fabricação em diversos setores industriais. O conceito I4.0 representa um estágio evolutivo dos sistemas de produção caracterizado pela quarta revolução industrial com ênfase nas transformações tecnológicas que surgiram na última década. Tal conceito, converge para um novo modelo de produção, no qual o mundo físico é conectado em tempo real com o mundo digital, resultando em sistemas ciber-físicos (*Cyber-physical System - CPS*), que são a base para a implantação das Fábricas Inteligentes (KAGERMANN *et al.*, 2013; LASI *et al.*, 2014; RÜßMANN *et al.*, 2015; GILCHRIST, 2016; SANDERS *et al.*, 2016; HOFMANN; RÜSCH, 2017; KOLBERG *et al.*, 2017).

Em 2017 a Comissão Europeia reconheceu a importância do tema e lançou medidas para dar suporte ao desenvolvimento de uma indústria digitalizada, com o intuito de preparar economicamente o continente para os emergentes desafios dos produtos e serviços digitais. Estratégias similares foram adotadas por outras economias, incluindo o plano chinês “*Made in China 2025*”, a criação da coalizão norte americana “*Smart Manufacturing Leadership Coalition*”, a estratégia italiana “*Piano Nazionale Industria 4.0*”, entre outras iniciativas (TIRABOSCHI; SEGUEZZI, 2016; MARQUES *et al.*, 2017).

Com os avanços na automação industrial, muitas empresas que antes gerenciavam suas tecnologias de processamento de forma independente umas das outras, agora estão fazendo investimentos significativos para integrar as modernas tecnologias de fabricação (AGARWAL; BREM, 2015). Embora o conceito a respeito da I4.0 esteja ainda em fase de desenvolvimento, organizações e instituições de pesquisa estão direcionando seus esforços para a criação de fábricas inteligentes, com base na automação digital e internet. (KAGERMANN *et al.*, 2013; ROBLEK *et al.*, 2016).

Neste cenário, a tônica trazida por Porter e Heppelmann (2014) é que a tecnologia da informação está tornando os produtos em sistemas complexos que combinam *hardware*, *software*, sensores, microprocessadores, armazenamento de dados e conectividade. Essa combinação acaba forçando as empresas a repensarem a forma como elas fazem tudo internamente para enfrentarem novas ameaças e oportunidades. Assim, entende-se que o paradigma da I4.0 vem criando novos desafios na gestão da manufatura e operações, ao possibilitar o uso de tecnologias digitais, incluindo Internet Industrial das Coisas (*Industrial Internet of Things - IIoT*), Simulação, CPS, inteligência artificial, *Big Data Analytics*, robótica avançada, manufatura aditiva, realidade aumentada, entre outras (KAGERMANN *et al.*, 2013; KULL, 2015; RÜßMANN *et al.*, 2015; WEINBERG *et al.*, 2015; TAMÁS *et al.*, 2016; MARQUES *et al.*, 2017; SCHWAB, 2017).

Roblek *et al.*, (2016), entendem que a quarta revolução industrial será marcada pela ampla automação e digitalização dos processos, bem como pelo uso de tecnologias da informação e dispositivos eletrônicos no ambiente de manufatura. Neste contexto, destaca-se a grande quantidade de informação disponível para a tomada de decisão proveniente da internet e das bases de dados que constituem o ambiente fabril digital e armazenam dados sobre o desempenho de máquinas, atendimento às especificações de clientes e programação de processos (CONSTANTINESCU *et al.*, 2014; O'DONOVAN *et al.*, 2015; GUIMIRE *et al.* 2017).

No âmbito da excelência operacional, espera-se que a integração entre as tecnologias I4.0 permitirão a coleta e análise de dados do processo de fabricação com maior acurácia e velocidade, ampliando as possibilidades para iniciativas empresariais como foco na redução de custos, defeitos e *lead time* (AGARWAL; BREM; 2015; TAMÁS *et al.*, 2016; DEVEZAS *et al.*, 2017; KANE *et al.*, 2015).

Com base nessas considerações, também é importante atentar para as críticas sobre as consequências de uma revolução digital nas fábricas. A principal delas, considera a redução dos postos de trabalho nas atividades econômicas um grande desafio imposto ao novo paradigma industrial (BRYNJOLFSSON; McAFEE, 2014; HIRSCH, 2016). Contudo, embora a I4.0 possa resultar em uma diminuição no número de operações manuais, alguns autores acreditam que o aumento na quantidade de dispositivos e tecnologias digitais também demandará operações mais complexas e novas competências para atuar neste novo cenário (PESSÔA; SPÍNOLA, 2014; BAYGIN *et al.*, 2016; PFEIFFER *et al.*, 2016; SCHUSTER *et al.*, 2016).

Um outro entendimento a respeito da I4.0 é apresentado por Daudt e Willcox (2016), ao refletirem sobre a estratégia da economia alemã para consolidar sua liderança no mercado global (*High-Tech Strategy*), por meio do desenvolvimento e comercialização de novas tecnologias e coordenação do governo federal com as empresas primordialmente alemãs, incluindo Siemens, Volkswagen, ABB, Bosch, Kuka e IBM. Neste cenário, a disseminação do tema I4.0 pelo governo alemão estaria estrategicamente orientada a buscar novos mercados e abrir possibilidades para a sua indústria em países emergentes, incluindo o Brasil.

Outro aspecto relativo ao tema diz respeito a real necessidade de conversão para o modelo de manufatura digital, visto que as tecnologias I4.0 não devem ser compreendidas como “panaceias”, no sentido de fomentar o mercado de consultorias e a comercialização de soluções em automação, sem a real necessidade de digitalização dos processos. Sob esse aspecto, Rother (2010) alerta que, embora as inovações tecnológicas sejam capazes de proporcionar vantagem competitiva, elas surgem raramente e podem ser copiadas pelos concorrentes. Além disso, Kane *et al.*, (2015) esclarecem que a relação entre tecnologias digitais e cultura organizacional requer uma mudança de mentalidade na organização antes de se iniciar a mudança tecnológica. Observa-se assim, que o uso de tecnologias digitais em processos de excelência operacional pode requerer o envolvimento da alta direção e o desenvolvimento de novas competências gerenciais capazes de lidar com esses desafios.

## 1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ABORDAGEM LEAN SIX SIGMA

As abordagens “Lean” e “Seis Sigma” são atualmente reconhecidas em todo o globo como importantes estratégias para alcançar a excelência operacional em qualquer tipo de organização (GEORGE, 2002). A partir dos anos 2000, vários autores passaram a abordar a integração entre essas práticas, com o propósito de melhorar os processos empresariais por meio da redução de defeitos, eliminação de desperdícios e diminuição de *lead time* (PANDE *et al.*, 2001; MEHRJERDI, 2001; GEORGE, 2002; ANTONY, 2004; BASS; LAWTON, 2009; SALAH *et al.*, 2010; CORBETT, 2011; PYSDEK; KELLER, 2011; ANDERSSON *et al.*, 2014).

As primeiras abordagens para integrar a automação industrial com a produção enxuta surgiram no início dos anos 90 e hoje, no contexto da I4.0, a concepção “*Lean Automation*” a partir do *Jidoka* representa uma maneira eficiente e eficaz em termos de custos para melhorar a flexibilidade dos sistemas de produção (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; MA *et al.*, 2017).

Recentemente, Snee e Hoerl (2017) apresentaram uma classificação da abordagem LSS argumentando que as mudanças macrosociais têm transformado esse paradigma de melhoria, que vem evoluindo desde a sua concepção, quando em 1987 a Motorola desenvolveu o programa Seis Sigma com o propósito de melhorar a qualidade dos processos de manufatura (Seis Sigma 1.0), passando pelo período de integração com a abordagem *lean* (Lean Six Sigma 1.2), até a sua atual concepção, que integra a cultura de inovação nos processos empresariais (Lean Seis Sigma 1.3). No entanto, esses autores acreditam ser necessário um novo paradigma capaz de gerar melhorias contínuas em um cenário que incorpora o gerenciamento de riscos e *Big Data Analytics* (Lean Seis Sigma 2.0).

Observa-se assim, que a evolução das tecnologias de automação e da informação podem favorecer a implementação de práticas LSS. Na visão de Pysdek e Keller (2011), a integração entre as tecnologias da informação e projetos LSS pode ocorrer de três formas: (i) dados armazenados pela empresa (*data warehousing*), disponíveis para serem usados em projetos LSS; (ii) Processamento Analítico *Online* (*Online Analytic Processing – OLAP*); e (iii) Mineração de Dados (*Data Mining*), que permite a análise retrospectiva dos dados, combinando avançadas técnicas e ferramentas matemáticas e estatísticas.

Do ponto de vista estratégico, a integração das tecnologias I4.0 com as práticas LSS pode ser viável, visto que ambas as abordagens compartilham dos mesmos objetivos. Rüßmann *et al.* (2015) salientam que os CPS serão capazes de se adaptarem às mudanças necessárias no complexo ambiente produtivo, prever falhas e analisar dados provenientes de máquinas, tornando a produção mais flexível e os processos mais eficientes por meio da redução de custos e aumento da qualidade. Contudo, tal integração não é uma ideia exclusivamente atrelada ao paradigma da I4.0. Duas décadas antes da disseminação dos conceitos inerentes à I4.0, Sohal e Singh (1992) já sinalizavam alguns benefícios decorrentes de estratégias de digitalização da manufatura no âmbito das práticas LSS. São eles: aumento na competitividade industrial; manufatura de baixo custo por unidade; redução da mão-de-obra direta; redução de estoques devido ao aumento da velocidade de processamento; aumento da qualidade do produto e redução de retrabalho; e flexibilidade para responder às mudanças de programação.

### 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS DE PESQUISA

Nos últimos anos, diversos autores têm abordado a integração de projetos LSS com outras abordagens ou técnicas da gestão da produção, incluindo Sistemas de Gestão da Qualidade ISO 9001 (KARTHI *et al.*, 2011; CHIARINI; VAGNONI, 2014; MARQUES *et al.*, 2016), Gestão da Cadeia de Suprimentos (KUMAR *et al.*, 2011; MISHRA e KUMAR, 2014; GUTIERREZ-GUTIERREZ *et al.*, 2016; ROBERTS *et al.*, 2017), Teoria das Restrições (LEE; CHANG, 2012; PACHECO, 2014; DEMCHUK; BAIT SAR, 2015), entre outras. A recente literatura sobre a I4.0 apresenta diversos exemplos de tecnologias digitais que podem ser eficazmente aplicadas nas operações de manufatura com o objetivo de melhorar os processos industriais (LEE *et al.*, 2014; PFEIFFER *et al.*, 2016; TANG *et al.*, 2016; TAMÁS *et al.*, 2016; BRANDENBURGER *et al.*, 2016; GUIMIRE *et al.*, 2017).

Desta forma, embora o conhecimento a respeito das tradicionais práticas LSS se encontra sedimentado na comunidade científica, identifica-se aqui uma oportunidade para a ampliação desse conhecimento, por meio de novas aplicações no âmbito da I4.0. Mesmo sendo possível encontrar na literatura estudos que integram parcialmente essas tecnologias com técnicas *Lean Manufacturing*, incluindo Mapeamento do Fluxo de Valor (SOUTHARD *et al.*, 2012; YANG *et al.*, 2015; TAMÁS *et al.*, 2016; RANE *et al.*, 2017; LUGERT *et al.*, 2018; MAYR, 2018), *kanbans* eletrônicos (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017; WAGNER *et al.*, 2017; ANTE *et al.*, 2018; SATOGLU *et al.*, 2018), controle digital da produção (HEDELIND; JACKSON, 2011; SOUTHARD *et al.*, 2012; NICOLETTI, 2013; KOLBERG *et al.*, 2017; RANE *et al.*, 2017; MA *et al.*, 2017; ROMERO *et al.*, 2018; SATOGLU *et al.*, 2018), padronização de processos com o uso de realidade aumentada (SCHMITT *et al.*, 2013; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS *et al.*, 2017; POWELL *et al.*, 2018; SATOGLU *et al.*, 2018), assim como trabalhos envolvendo técnicas específicas da abordagem Seis Sigma, incluindo QFD (LI *et al.*, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; LAUX *et al.*, 2017) e controle da qualidade (HOERL *et al.*, 2014; MAYR *et al.*, 2018). É importante destacar que a investigação em profundidade dos pontos de convergência (PCs) entre as práticas LSS com tecnologias I4.0 e seus impactos ainda não foi evidenciada nesses estudos, o que representa uma importante lacuna teórica. Assim, as questões de pesquisa que norteiam este estudo são: (QP1) *Quais são os pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e as práticas LSS?* (QP2) *Como é possível implementar esses pontos de convergência em processos de manufatura?* (QP3) *Quais são os resultados decorrentes dessa integração?*

Diante dessas considerações, o objetivo geral desta tese é **analisar os pontos de convergência entre tecnologias I4.0 e práticas LSS em processos de manufatura**. É importante fazer uma distinção entre objetivos gerais e objetivos específicos, visto que enquanto o objetivo geral define o propósito do trabalho, os objetivos específicos operacionalizam a pesquisa ao especificar o modo como se pretende atingir o objetivo geral (ROESCH, 2006). Desta forma, os objetivos específicos deste trabalho compreendem:

- a) Investigar o estado da arte sobre “Práticas LSS” e “I4.0”, a fim de caracterizar esse tipo de interação por meio da identificação dos pontos de convergência entre os dois temas, das suas especificidades e dos resultados decorrentes dessa interação;
- b) Desenvolver uma estrutura de análise de pesquisa conceitual para a investigação empírica dessa interação por meio de estudos de caso;
- c) Analisar a aderência da estrutura de análise de pesquisa com base nos resultados obtidos nos estudos de caso envolvendo organizações com *expertise* nas práticas LSS, cujos processos de manufatura forneçam evidências de aplicação de tecnologias I4.0 nessas práticas.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Com base no que foi exposto é notório que a abordagem LSS precisa acompanhar a evolução tecnológica presente nos ambientes industriais. Conforme destacado por Antony (2004), o futuro da abordagem LSS depende da inclusão de novas ferramentas e técnicas, de modo a atualizar as práticas LSS face às mudanças impostas pelo mercado. De acordo com Kolberg e Zühlke (2015), a implementação de soluções I4.0 geralmente requer grandes investimentos e integração com práticas simples, como por exemplo as iniciativas *lean*, de modo a reduzir os custos no processo de conversão para o novo modelo de manufatura.

Diversos autores corroboram a ideia de que há uma carência de estudos voltados para a interação entre práticas de excelência operacional e tecnologias I4.0 (NICOLETTI, 2013; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; SNEE; HOERL, 2017). Portanto, o conceito sobre I4.0 encontra-se hoje em um estado incipiente, tanto na comunidade científica, como empresarial. Há uma carência de estudos direcionados para esta nova concepção de manufatura, principalmente com relação às práticas de excelência operacional e melhoria contínua dos processos de manufatura.

Por outro lado, a adoção de novas tecnologias, tais como dispositivos RFID, *wireless* e sensores vêm criando uma pressão competitiva e tecnológica forçando as empresas a inovarem e transformarem elas mesmas (LEE; LEE, 2015). Como contribuição teórica da pesquisa busca-se encontrar evidência a respeito da interação entre tecnologias da I4.0 e práticas LSS, assim como os resultados decorrentes dessa interação. De forma prática, busca-se recomendações aos profissionais que atuam na área de excelência operacional sobre quais tecnologias digitais seriam aplicadas às práticas LSS de modo a obter os resultados desejados.

## 1.5 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho está estruturado em 5 seções. A primeira seção apresenta uma breve contextualização a respeito do tema da pesquisa de modo a caracterizar a interação entre o paradigma da I4.0 com a abordagem LSS. Apresentam-se também os problemas e os objetivos da pesquisa, bem como as justificativas e a relevância desta tese.

Uma parte do referencial teórico que sustenta este trabalho é apresentado na seção 2, onde os conceitos fundamentais relacionados ao tema da pesquisa foram desdobrados em dois tópicos: (2.1) Definições a respeito da Abordagem LSS; e (2.2) Conceitos sobre I4.0, que abrange uma perspectiva evolutiva dos paradigmas industriais que resultaram na quarta revolução industrial, assim como algumas definições sobre as tecnologias habilitadoras da I4.0.

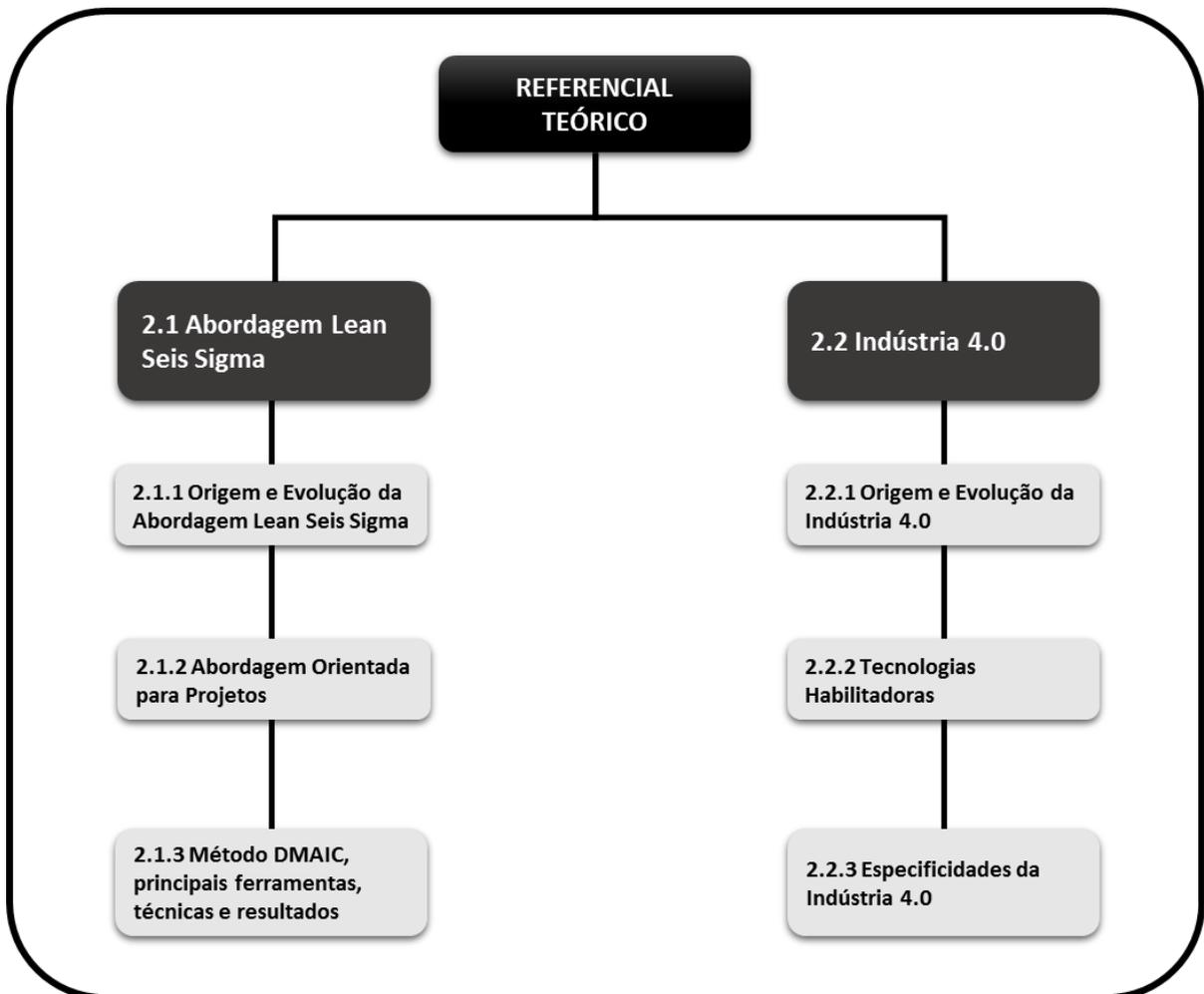
A seção 3 descreve os aspectos metodológicos e o delineamento da pesquisa que contempla os procedimentos estabelecidos para a condução da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), assim como a estratégia definida para a coleta e análise dos dados referente o estudo multicase (estudo de campo). Os resultados da pesquisa são apresentados na seção 4.

Por fim, a seção 5 apresenta as considerações finais da tese, relatando o atendimento aos objetivos da pesquisa, implicações teóricas e gerenciais, bem como as limitações encontradas no estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico desta tese compreende dois temas centrais. A seção 2.1 apresenta uma fundamentação teórica a respeito da abordagem LSS destacando sua origem e evolução, assim como algumas pressuposições pragmáticas inerentes ao tema. A seção 2.2, por sua vez, aborda os principais conceitos em torno da I4.0. Convém destacar que para encontrar respostas à primeira questão da pesquisa, o estudo teórico incluiu uma RSL resultando na identificação de 33 pontos de convergência entre essas duas abordagens. O planejamento e os resultados dessa revisão serão respectivamente apresentados nas seções 3.2.1 e 4.1. A Figura 1 apresenta a estrutura adotada para a construção desta seção.

Figura 1 - Estrutura do referencial teórico



Fonte: Elaborado pelo autor

## 2.1 ABORDAGEM LEAN SEIS SIGMA

A literatura a respeito da abordagem LSS encontra-se bem estruturada, com inúmeros estudos que consolidam os conceitos relacionados ao tema. Esta seção apresenta um referencial teórico sobre a origem e evolução da abordagem LSS, com ênfase na abordagem orientada a projetos de excelência operacional, suas técnicas e ferramentas.

### 2.1.1 Origem e Evolução da Abordagem Lean Seis Sigma

O termo *Lean Manufacturing* ou “*Lean Production*” foi inicialmente apresentado no Massachusetts Institute of Technology – MIT por meio do artigo “*The Triumph of the Lean Production System*” (KRAFCIK, 1988). Contudo, o conceito ganhou popularidade mundial após a publicação do livro “*A Máquina que mudou o mundo*”, baseado em um amplo estudo sobre as tendências na indústria automobilística, com destaque para o eficiente Sistema Toyota de Produção - STP (WOMACK *et al.*, 1990). Os princípios básicos para a implementação do STP foram posteriormente apresentados por Womack e Jones com o propósito de reduzir os desperdícios na produção e acelerar os processos a partir do “pensamento enxuto” por meio das seguintes ações: (i) especificação do valor sob o ponto de vista do cliente; (ii) identificação do fluxo de valor para cada família de produto; (iii) promoção do fluxo contínuo; (iv) produção puxada a partir das necessidades do cliente e; (v) contínua busca pela perfeição (WOMACK; JONES, 1996).

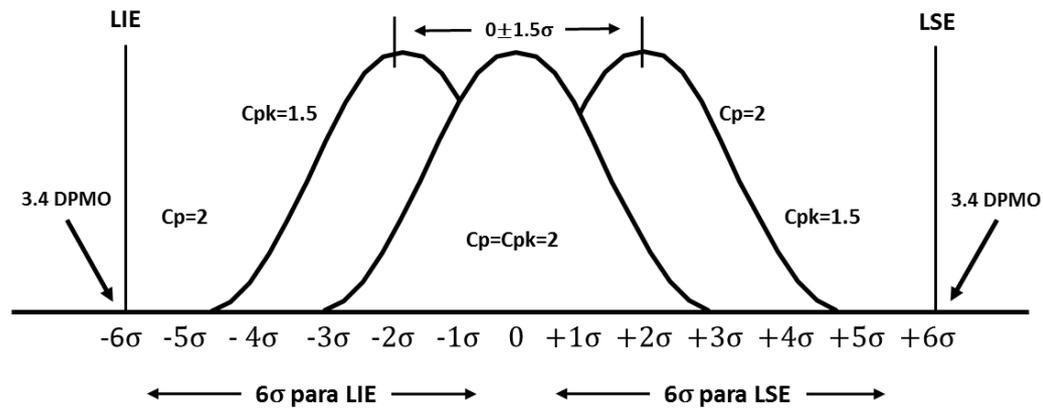
Idealizado por Taiichi Ohno na década de 1950, o STP tinha como objetivo principal a redução dos custos industriais e a remoção dos desperdícios inerentes aos processos de fabricação na Toyota Motors *Company*. Tal estratégia é alicerçada por dois pilares: (i) o Sistema *Just in Time*, que consiste em uma técnica para produzir a quantidade necessária, no tempo necessário e na qualidade necessária; e (ii) *Jidoka*, que propõe a utilização conjunta de máquinas e pessoas, de forma a assegurar a qualidade do produto por meio de ferramentas como dispositivos à prova de falhas, controle visuais e inspeção 100% automatizada (LIKER, 2005; WILSON, 2010). Além disso, o STP também propõe a implementação de um conjunto de técnicas e ferramentas implementadas por colaboradores capacitados visando a eliminação de sete categorias de desperdícios, também conhecidos como “*muda*”. São eles: superprodução; estoque; transporte; defeitos; processamento inadequado; movimentação; e atraso (WOMACK; JONES, 1996; LIKER, 2005; HIRANO, 2009).

O Seis Sigma, por sua vez, pode ser compreendido como uma abordagem disciplinada, orientada para projetos e baseada em métodos estatísticos para reduzir a variabilidade, remover defeitos e eliminar desperdícios de produtos, processos e serviços (MONTGOMERY; WOODALL, 2008). O programa Seis Sigma foi originalmente desenvolvido na Motorola em 1987, com o propósito de melhorar a qualidade de seus produtos. Os resultados decorrentes da implementação dos primeiros projetos na Motorola durante a primeira década proporcionaram uma economia mensurada em US\$ 14 bilhões e reconhecimento nacional por meio do Prêmio Americano de Qualidade *Malcolm Baldrige* (PANDE *et al.*, 2000). Na década seguinte, diversas empresas implementaram com êxito a metodologia Seis Sigma, incluindo General Eletric, Allied Signal, Black & Decker, Bombardier, Dupont, Asea Brown Boveri, Dow Chemical, Johnson & Johnson, Kodak, Sony, Toshiba, entre outras (PANDE *et al.*, 2000; ECKES, 2002; TAGHIZADEGAN, 2006; CORBETT, 2011).

No que se refere ao conceito estatístico empregado para denominar o Programa da Motorola, Montgomery e Woodall (2008) explicam que o termo “Seis Sigma” é utilizado para descrever a capacidade de um processo em gerar apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), assumindo uma distribuição normal e média deslocada de  $1,5\sigma$  dos limites de especificação. Esses autores também reforçam que o nível sigma como uma métrica tem gerado controvérsia entre alguns especialistas, visto que o processo poderia ser deslocado acima de  $1,5\sigma$ , tornando a regra arbitrária.

Observando a figura 2 é possível compreender melhor esse conceito ao comparar a variabilidade de um processo que apresenta distribuição normal, com os limites de especificação inferior e superior (LIE e LSE). De acordo com a ideia disseminada na Motorola, a variação natural de um processo sob controle faz com que a localização da sua distribuição se mova dentro dos limites de especificação em aproximadamente  $\pm 1.5\sigma$ . Neste sentido, o objetivo é reduzir a variabilidade do processo dentro dos limites de controle, de modo alcançar um nível de qualidade  $6\sigma$ , esperando não mais que 3,4 DPMO caiam fora dos limites (WALKER, 2005). Deste modo, o pensamento estatístico está fortemente presente na abordagem Seis Sigma ao considerar a redução da variabilidade inerente aos processos. Além disso, em termos matemáticos, um processo pode ser compreendido como uma função de transferência,  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , onde as causas-raízes ou entradas ( $x$ 's) são convertidas em saídas ( $Y$ 's) do processo (PANDE *et al.*, 2001; PYSDEK; KELLER, 2011).

Figura 2 - Definição da Motorola para o conceito Seis Sigma



Fonte: Walker (2005, p.3).

A combinação das abordagens *Lean* e Seis Sigma tornou-se uma das metodologias híbridas mais reconhecidas no campo da excelência operacional (BENDELL, 2006), podendo ser compreendida como uma metodologia que busca a eliminação dos defeitos e da variação inerente aos processos por meio da estrutura DMAIC, para alcançar a satisfação do cliente em relação a qualidade, velocidade e custo (SALAH *et al.*, 2010; ISMYRLIS; MOSCHIDIS, 2013). A proposta de integração entre as duas abordagens foi inicialmente apresentada no livro *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma with Lean Speed* (GEORGE, 2002).

Enquanto o foco das iniciativas *lean* reside na redução dos desperdícios em todos os processos e no aumento da velocidade, a estratégia Seis Sigma concentra as ações para o desenvolvimento de projetos, eliminação de defeitos, redução da variabilidade inerente ao processo e redução de custos (ANDERSSON *et al.*, 2014). Contudo, diversos estudos reforçam a complementaridade entre as duas abordagens. George (2002), por exemplo, esclarece que enquanto a abordagem *lean* é incapaz de conduzir um processo em direção ao controle estatístico de forma isolada, a abordagem Seis Sigma não consegue melhorar drasticamente a velocidade de uma atividade ou reduzir os desperdícios associados a ela.

### 2.1.2 Abordagem orientada para projetos

Conforme apresentado anteriormente, o referencial teórico sobre a abordagem LSS encontra-se bem estruturado cobrindo as seguintes características (PANDE *et al.*, 2001; ECKES, 2002; MONTGOMERY; WOODALL, 2008; CORBETT, 2011; PYSDEK; KELLER, 2011; ISMYRLIS; MOSCHIDIS, 2013):

- Abordagem orientada para projetos com impacto financeiro;

- Métodos bem definidos para a melhoria do desempenho de um produto, processo ou serviço existente (DMAIC), ou para o desenvolvimento de um produto, processo ou serviço novo e inovador (DMADV);
- Estrutura organizacional e capacitação LSS, que abrange um grupo de profissionais especializados na condução de projetos LSS, conhecidos como *green belts*, *black belts*, *master black belts*, *champions* e praticantes *lean*;
- Aplicação de ferramentas e técnicas estatísticas adequadas a cada fase dos ciclos DMAIC/DMADV, de acordo com o propósito do projeto LSS;
- Resultados financeiros decorrentes da implementação de projetos LSS.

As considerações apresentadas acima esclarecem que a abordagem LSS possui como forte característica, o tratamento das atividades como um projeto. Desta forma, os projetos que empregam as ferramentas de melhoria *lean* por meio da metodologia DMAIC são reconhecidos como Projetos LSS (SNEE, 2010). Não obstante, a seleção de projetos é usualmente baseada na tradução da estratégia empresarial (*top-down*) em objetivos operacionais e financeiros e requer uma estrutura organizacional constituída por profissionais capazes de liderar projetos LSS, com base em diversas técnicas e responsabilidades específicas (CORBETT, 2011). De acordo com Pysdek e Keller (2011):

Os projetos são as principais atividades que levam às mudanças na empresa Seis Sigma. Embora possam acontecer mudanças devido a outros esforços, tais como *kaizen*, a mudança baseada em projetos é a que traz progresso e transformações culturais (Pysdek; Keller, 2011, p. 117).

A abordagem orientada para projetos assegura que resultados em termos de qualidade, custo, *lead time* e satisfação do cliente sejam alcançados por meio de um enfoque sistemático que integra aspectos humanos e técnicos inerentes ao processo a ser melhorado (SNEE, 2010). O Quadro 1 ilustra os principais benefícios decorrentes do enfoque sistemático proporcionado pelos projetos LSS.

Quadro 1 - Aspectos humanos e técnicos da melhoria

Aspectos Humanos	Aspectos Técnicos
Foco em resultados (\$)	Melhoria dos processos
Liderança	Análise da variabilidade
Senso de urgência	Enfoque disciplinado
Foco no cliente	Medidas quantitativas
Trabalho em equipe	Métodos e pensamento estatístico
Cultura de mudança	Gestão de processos

Fonte: Snee (2010, p. 11)

Montgomery e Woodall (2008) esclarecem que os projetos LSS são geralmente implementados entre 4 a 6 meses e validados pela área contábil ou financeira da organização. Além disso, esses projetos podem ter os mais variados escopos e cobrir diversos setores não ligados a produção de bens de consumo, como hospitais, transportes, administração, entre outros (OPRIME *et al.*, 2011). No entendimento de Snee (2004), os projetos LSS diferem de outras iniciativas por apresentar 4 aspectos:

- a) **Foco em resultados.** Nenhum projeto deve ser aprovado se não apresentar um impacto financeiro consistente. Segundo o autor, as iniciativas Seis Sigma têm gerado um retorno médio superior a US\$ 175.000,00/ano/projeto;
- b) **Integração do elemento humano com o processo de melhoria.** Algumas iniciativas reforçam o trabalho em equipe e cultura de mudança, enquanto outras enfatizam o processo de melhoria por meio da aplicação de ferramentas estatísticas tais como planejamento de experimentos e controle estatístico de processo;
- c) **Metodologia específica.** A metodologia DMAIC possibilita o senso de urgência e enfatiza a implementação de projetos dentro de um prazo determinado (geralmente entre três a seis meses);
- d) **Infraestrutura técnica.** A iniciativa Seis Sigma envolve um grupo de profissionais tecnicamente capacitados que desempenham papéis específicos para liderar, desenvolver e implementar os projetos.

Conforme apresentado anteriormente, as organizações com cultura de excelência operacional e implementação de projetos LSS contam com uma estrutura de especialistas incluindo *Green Belts* (GB), *Black Belts* (BB), *Master Black Belts* (MBB), *Champions* e *Lean Practitioners* (LP). Esses profissionais recebem treinamentos específicos em ferramentas estatísticas e de resolução de problemas e combinam suas atividades diárias designadas ao cargo com a implementação de projetos LSS (MONTGOMERY; WOODALL, 2008).

De forma semelhante como ocorre a classificação hierárquica das habilidades nas artes marciais, a Motorola adotou a classificação por cores de faixas (*belts*) para diferenciar os colaboradores em termos de competências e conhecimentos em estatística e técnicas de melhoria de processos e produtos (PANDE *et al.*, 2001). Assim, os MBB representam a liderança nos programas LSS e atuam em um nível mais alto de proficiência técnica, sendo necessário possuir conhecimentos adicionais, incluindo o domínio de métodos estatísticos, gerenciamento de projetos, *coaching*, ensino e estruturação do programa em toda a empresa (PYSDEK; KELLER, 2011).

Além dos especialistas técnicos, os patrocinadores ou “*champions*”, como são denominados os líderes dos processos, devem direcionar e sugerir os temas de projetos e garantir que os recursos necessários sejam disponibilizados para assegurar a eficácia dos projetos LSS (ECKES, 2002; MONTGOMERY; WOODALL, 2008). Diante dessas considerações percebe-se que a abordagem LSS requer especialistas com maior capacidade analítica, representando um seleto grupo dentro da organização. Por outro lado, as ferramentas *Lean*, por não serem de alta complexidade, podem ser disseminadas para um número maior de colaboradores, incluindo operadores que atuam no chão de fábrica.

Apesar dos benefícios decorrentes do LSS serem expressivos, é possível evidenciar na literatura importantes críticas, dificuldades e desafios inerentes a implementação dessas metodologias. A respeito da abordagem *lean*, Pepper e Spedding (2010) explicam que ambientes de manufatura com grande variedade de produtos podem resultar em diferentes trabalhos dificultando a padronização das atividades. Arnheiter e Maleyeff (2005) esclarecem alguns equívocos, como por exemplo, a crença que a filosofia *lean* funcionaria apenas no Japão e que a abordagem é adequada apenas para processos de manufatura em lotes.

Outra crítica sobre a abordagem *lean* diz respeito às possíveis demissões (*layoffs*), visto que o próprio termo “*lean*” poderia ser equivocadamente interpretado como diminuição da força de trabalho. Contudo, de acordo com o pensamento enxuto, as demissões devem ser evitadas, pois esse tipo de ação seria contraproducente, uma vez que um operador experiente não estaria mais disponível e os demais operadores relutariam em participar de projetos futuros (EMILIANI *et al.*, 2003; ARNHEITER; MALEYEFF, 2005).

Com relação a abordagem Seis Sigma, Pande *et al.*, (2001) esclarecem algumas incompreensões e falsas ideias, geralmente relacionadas com a visão restrita sobre o enfoque puramente estatístico, assim como à aplicação exclusivamente em ambientes fabris. Outro desafio inerente à essa abordagem é o comprometimento da alta administração, visto que a efetividade do programa está relacionada com o envolvimento e suporte dos líderes da organização. Neste contexto, Snee (2010) alerta para desconfiança na eficácia da abordagem, assim como a falta de diretrizes para a implementação dos projetos de melhoria. Antony (2004) destaca que a falta de uniformidade nos programas de treinamento e nas consultorias (como a formação de *belts*, por exemplo) pode ameaçar a credibilidade do programa, do mesmo modo como ocorreu com os Programas de Qualidade Total.

### 2.1.3 Método DMAIC, Principais Ferramentas, Técnicas e Resultados

Os projetos LSS podem ser conduzidos por meio de dois enfoques sistemáticos. Para produtos e processos existentes, os projetos devem seguir a metodologia DMAIC (*Define, Measure, Analyse, Improve e Control*), já para as atividades de desenvolvimento de produtos e processos (*Design for Six Sigma*), recomenda-se a metodologia DMADV (*Define, Measure, Analyse, Design e Verify*). Assim, para cada fase do projeto, ferramentas e técnicas específicas devem ser utilizadas para medir, analisar dados, encontrar causas de problemas e determinar as melhores condições para o propósito do projeto (PANDE *et al.*, 2001; ECKES, 2002; BASS; LAWTON, 2009; MEHRJERDI, 2011; PYSDEK; KELLER, 2011).

De acordo com Salah *et al.*, (2010), o modelo DMAIC pode ser compreendido como uma evolução do ciclo *Plan-do-check-act* (PDCA) disseminado por Deming, podendo fazer uso apenas de ferramentas *lean*, comumente usadas para solucionar problemas, sem a necessidade análises de dados complexas. Ismyrlis e Moschidis (2013) explicam que no âmbito da excelência operacional, o termo “ferramenta” é utilizado para descrever uma simples forma para solucionar um problema, enquanto o termo “técnica” refere-se à aplicação de diversas ferramentas. Contudo, Salah *et al.*, (2010), esclarecem que algumas ferramentas podem ser comumente utilizadas nos projetos LSS, independente da ênfase dada à abordagem (*lean* ou SS). Conforme ilustrado na Figura 3, dentre essas ferramentas comuns destacam-se o mapeamento de processos, *brainstorming*, padronização e dispositivos *poka-yoke* (ou *mistake proofing*). Por outro lado, as demais ferramentas podem ser associadas à uma ou outra abordagem, como por exemplo, as ferramentas de análise estatística inferencial (tais como teste de hipótese, DOE, MSA etc.) associadas à abordagem Seis Sigma ou as ferramentas mais simples, que não requerem análise estatística (incluindo SMED, *kanban*, diagrama de espaguete etc.), geralmente relacionadas às técnicas *Lean Manufacturing*.

Figura 3 - Ferramentas comuns à abordagem LSS



Fonte: Salah *et al.*, (2010, p. 251)

Observa-se portanto, que a integração entre as diferentes abordagens oferece possibilidades tanto para a redução de desperdícios e *lead time* usando ferramentas específicas *lean* (SMED, VSM, TPM etc.), assim como oportunidades para a redução da variabilidade dos processos por meio de análise de dados e uso de *softwares* com soluções estatística, tais como Microsoft Excel®, Sigma XL® e Minitab® (BASS; LAWTON, 2009).

O estado da arte sobre a abordagem LSS contempla diversos modelos, com diferentes configurações para a estrutura DMAIC (PANDE *et al.*, 2001; ECKES, 2002; SNEE, 2004; KUMAR *et al.*, 2006; TAGHIZADEGAN, 2006; MONTGOMERY; WOODALL, 2008; BASS; LAWTON, 2009; MEHRJERDI, 2011; PYSDEK; KELLER, 2011; DE MAST; LOKKERBOL, 2012; ISMYRLIS; MOSCHIDIS, 2013). Tais modelos divergem entre si com relação à alocação das ferramentas e técnicas específicas em cada fase do modelo DMAIC. A Figura 4 apresenta uma síntese do DMAIC a partir da análise dessas publicações. É importante ressaltar que essa configuração não tem caráter prescritivo, de modo a esgotar as possibilidades de combinação de ferramentas e técnicas inerentes ao modelo DMAIC. Contudo, a figura permite uma clara compreensão a respeito dos objetivos e possibilidades de aplicação das diversas ferramentas e técnicas na implementação de projetos LSS.

Figura 4 - Objetivos, ferramentas e técnicas aplicadas nas fases DMAIC

PASSOS DMAIC	OBJETIVOS	PRINCIPAIS FERRAMENTAS E TÉCNICAS
<b>DEFINIÇÃO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir objetivos e ganhos com o projeto</li> <li>Definir os requisitos dos clientes (CTQs)</li> <li>Desenvolver uma declaração dos problemas</li> <li>Elaborar e obter a aprovação do Project Charter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Projeto Charter</li> <li>Diagrama SIPOC</li> <li>Árvore CTQ</li> <li>QFD</li> </ul>
<b>MEDIÇÃO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mapear o processo</li> <li>Definir defeitos, oportunidades e métricas LSS</li> <li>Validar o Sistema de Medição</li> <li>Estabelecer a função <math>Y=f(x)</math></li> <li>Determinar a capacidade e Nível Sigma atual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mapeamento de processo</li> <li>Value Stream Mapping</li> <li>Gráficos básicos e Estatística Descritiva</li> <li>Análise do Sistema de Medição (MSA)</li> <li>Análise de Capacibilidade</li> </ul>
<b>ANÁLISE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificar desperdícios e atividades NAV</li> <li>Analisar o desempenho do processo</li> <li>Formular e testar hipóteses</li> <li>Avaliar modos de falhas e seus efeitos</li> <li>Identificar fontes de variação das causas-raízes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gráficos básicos</li> <li>Análise de Muda (7 desperdícios)</li> <li>Diagrama de causa e efeito</li> <li>FMEA</li> <li>Análise Estatística (Descritiva e Inferencial)</li> </ul>
<b>MELHORIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gerar ideias e soluções</li> <li>Conduzir Planejamento de Experimentos</li> <li>Validar melhorias potenciais e estudos pilotos</li> <li>Avaliar solução potencial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brainstorming</li> <li>DOE</li> <li>Simulação</li> <li>5S</li> <li>SMED / TPM</li> <li>5W2H</li> </ul>
<b>CONTROLE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir um Plano de Controle para o processo</li> <li>Padronizar as atividades</li> <li>Implementar Controle Estatístico de Processo – CEP</li> <li>Encerrar o projeto e compartilhar os resultados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gráficos de Controle (atributo e variável)</li> <li>Análise de Capacibilidade</li> <li>Padronização</li> <li>Plano de Controle</li> <li>Mistake Proofing (poka-yoke)</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando que a abordagem LSS possui um enfoque voltado para resultados mensurados financeiramente (SNEE, 2010), torna-se importante compreender as diversas formas de retorno financeiro ou “*saving*” decorrentes dos projetos LSS. Sob esse aspecto, o Quadro 2 sintetiza os principais resultados decorrentes de iniciativas LSS, apresentando o conceito pertinente a cada resultado, a partir da literatura sobre o tema.

Quadro 2 - Resultados decorrentes dos projetos LSS

Resultados	Conceito	Referências
<b>Produtividade</b>	Aumento da produtividade por meio da redução ou eliminação de atividades que não agregam valor ao processo.	Eckes (2002); Snee (2004); Liker (2005); Montgomery e Woodall (2008); Bass e Lawton (2009); Ismyrlis e Moschidis (2013); Lande <i>et al.</i> , (2016); Protzman <i>et al.</i> ,(2016).
<b>Tempo de Ciclo e Lead Time</b>	Redução do tempo necessário para executar uma tarefa. A redução do tempo de Ciclo aumenta a eficiência e a produtividade de um processo. A redução dos níveis de estoque e do tempo de <i>setup</i> proporciona redução no tempo de ciclo.	Kumar <i>et al.</i> , (2006); Bass e Lawton (2009); Salah <i>et al.</i> , (2010); Snee (2010); Ismyrlis e Moschidis (2013); Lande <i>et al.</i> , (2016); Protzman <i>et al.</i> ,(2016).
<b>Qualidade</b>	Na abordagem Seis Sigma, a qualidade pode ser sinônimo de redução da variabilidade inerente aos processos e consequente redução do índice de defeitos por milhão de oportunidades (DPMO).	Snee (2004); Liker (2005); George (2002); Kumar <i>et al.</i> , (2006); Montgomery e Woodall (2008); Bass e Lawton (2009); Salah <i>et al.</i> , (2010); Corbett (2011); Ismyrlis e Moschidis (2013); Protzman <i>et al.</i> ,(2016).
<b>Custos</b>	Custos relacionados com desperdícios e retrabalho. Os custos associados aos processos também devem incluir o efeito das perdas inerentes ao Rendimento Final do Processo ( <i>Rolled Throughput Yield – RTY</i> ).	Snee (2004); Liker (2005); George (2002); Kumar <i>et al.</i> , (2006); Montgomery e Woodall (2008); Bass e Lawton (2009); Salah <i>et al.</i> , (2010); Corbett (2011); Pysdek e Keller (2011); Ismyrlis e Moschidis (2013).
<b>Estoques</b>	Na concepção <i>lean</i> , os estoques (inventário) representam desperdício e devem ser minimizados. A superprodução pode resultar em altos níveis de inventário.	Liker (2005); Kumar <i>et al.</i> , (2006); Salah <i>et al.</i> , (2010); Snee (2010); Ismyrlis e Moschidis (2013); Lande <i>et al.</i> , (2016); Protzman <i>et al.</i> , (2016).
<b>Delivery</b>	O indicador de entrega ( <i>Delivery</i> ) mensura a eficácia das entregas efetuadas corretamente dentro dos prazos acordados com o cliente.	Eckes (2002); George (2002); Liker (2005); Kumar <i>et al.</i> , (2006); Snee (2010); Okhovat <i>et al.</i> (2012); Ismyrlis e Moschidis (2013).
<b>Disponibilidade</b>	A disponibilidade de um equipamento é obtida através da divisão entre o tempo real em que um processo está produzindo pela quantidade de tempo que foi planejada para a produção.	Liker (2005); Kumar <i>et al.</i> , (2006); Pysdek e Keller (2011); Okhovat <i>et al.</i> (2012); Lande <i>et al.</i> , (2016); Protzman <i>et al.</i> (2016).
<b>Cultura de Melhoria Contínua</b>	Cultura de exposição e solução dos problemas disseminada aos operadores de forma continuada.	Pande <i>et al.</i> , (2001); Eckes (2002); Liker (2005); Montgomery e Woodall (2008); Salah <i>et al.</i> , (2010); Snee (2010); Corbett (2011); Pysdek e Keller (2011); Lande <i>et al.</i> , (2016).

Fonte: Elaborado pelo autor

## 2.2 INDÚSTRIA 4.0

A presente seção é dedicada ao paradigma da quarta revolução industrial e apresenta a evolução histórica do conceito sobre I4.0. Uma breve descrição das tecnologias habilitadoras, assim como algumas especificidades das fábricas inteligentes também são apresentadas de modo a fornecer uma visão pragmática sobre o tema.

### 2.2.1 Origem e Evolução do termo Indústria 4.0

A classificação das transformações sociais e econômicas seguindo uma ordem cronológica não é novidade no campo de estudo das organizações. Alvin Tofler (1980), em sua obra “*A terceira onda*” propôs a classificação das principais mudanças sociais em três períodos denominados “ondas”, fazendo referência às revoluções agrícola, industrial e digital. O paradigma da manufatura enxuta foi apresentado inicialmente por Womack, Jones e Roos (1990) na obra “*A máquina que mudou o mundo*”, por meio de um estudo comparativo entre três paradigmas históricos da manufatura: produção artesanal, produção em massa e produção enxuta. Thomas Friedman (2005), em sua obra intitulada “*O mundo é plano*”, também descreve os principais agentes de mudanças econômicas, sociais e tecnológicas, segundo uma classificação em três períodos denominados Globalização 1.0, 2.0 e 3.0.

A primeira grande transformação social ocorreu por volta de 10.000 anos atrás e levou milhares de anos para acabar. A Revolução Agrícola avançou lentamente ao redor do mundo e combinou esforços para domesticar animais e melhorar a produção de alimentos, permitindo um novo modo de vida ao estimular a aglomeração de pessoas para dar origem às primeiras cidades (TOFLER, 1980; SCHWAB, 2017). No entanto, a primeira revolução na manufatura, ou “**Indústria 1.0**”, ocorreu no século XVIII com o desenvolvimento tecnológico no norte da Inglaterra, onde as fábricas passaram a usar carvão e vapor como fonte de energia para impulsionar as máquinas que fiavam e teciam lã e algodão (BLAINEY, 2008). As transformações e os impactos na produtividade industrial decorrentes dessa inovação podem ser caracterizados da seguinte forma:

A esse tipo de máquina, James Watt, um escocês, trouxe melhorias fundamentais. Seu maravilhoso dispositivo de 1769, o condensador, finalmente produzia cerca de três vezes a quantidade de vapor ou energia com a mesma tonelada de carvão. Praticamente todos os grandes passos na evolução da máquina a vapor foram dados pelos engenhosos britânicos ao tentar resolver problemas práticos que surgiam no trabalho diário nas novas indústrias em desenvolvimento (BLAINEY, 2008, p.260).

Outros avanços que possibilitaram o aumento da produção com custos baixos também foram importantes para a Primeira Revolução Industrial. Dezordi (2008) destaca a invenção do descaroçador de algodão por Eli Whitney, a mineração do carvão, que representava a principal matéria-prima para a máquina a vapor e o desenvolvimento ferroviário, que impulsionou a indústria siderúrgica.

A segunda revolução industrial ou “**Indústria 2.0**” foi impulsionada por um conjunto de inovações técnicas, disseminadas principalmente em países com vocação industrial incluindo Estados Unidos, Japão e outros países da Europa (França, Bélgica, Alemanha e Itália). Com o aperfeiçoamento da energia elétrica e o desenvolvimento da indústria automobilística, novos processos produtivos foram desenvolvidos com o propósito de obter ganho de escala, produtos padronizados e custo reduzido (DEZORDI, 2008). As inovações nos métodos de produção concebidas na indústria norte americana impulsionaram o segundo paradigma industrial, visto que o país adotou o novo sistema de fabricação, desenvolveu um estilo único de produção, e, finalmente, liderou os avanços nas comunicações e nos transportes que geraram a segunda revolução industrial (HOPP; SPEARMAN, 2013).

Dentre essas inovações, destaca-se a linha de montagem móvel implementada por Henry Ford na fábrica de Highland Park em 1908, que proporcionou vantagens competitivas em termos de produtividade, baixo custo de produção e velocidade de processo. No mesmo período, a Administração Científica de Frederick W. Taylor, também conhecida por “Taylorismo”, incentivava a decomposição do processo de fabricação em etapas, a fim de alcançar a melhor maneira de se executarem as tarefas, buscando atingir a máxima eficiência da produção (DEZORDI, 2008; HOPP; SPEARMAN, 2013).

Após o período de prosperidade econômica mundial entre o fim da Segunda Guerra Mundial e a crise do petróleo em 1973, muitas empresas passaram por problemas econômicos decorrentes da queda na demanda por produtos industrializados, que aumentaram o excesso de capacidade ociosa e o custo fixo, e também enfrentaram a forte concorrência de empresas japonesas que conseguiram melhores resultados através de mudanças tecnológicas e organizacionais implementadas a partir da década de 1950. Diante desse cenário, muitas organizações buscaram estratégias de racionalização e alternativas tecnológicas para reduzir custos e aumentar a produtividade, principalmente com a intensificação do uso da microeletrônica e automação (FARAH JÚNIOR, 2000).

Nessa conjuntura, a terceira revolução industrial ou “**Indústria 3.0**” se desenvolveu em meados dos anos 1960 com a denominação de revolução digital, onde as transformações tecnológicas mais expressivas foram o desenvolvimento dos semicondutores e computadores de grande porte (*mainframe*) na década de 1960, o aperfeiçoamento dos primeiros computadores pessoais, entre as décadas de 1970 e 1980, assim como a disseminação da internet, na década de 1990 (SCHWAB, 2017). Tal revolução criou oportunidades a serem exploradas com a eletrônica de consumo, automação e tecnologia da informação.

Esses avanços tecnológicos permitiram uma rápida mudança na capacidade de processamento, armazenamento, distribuição e transmissão de informações dos equipamentos através de redes de comunicação, tornando o conhecimento uma mercadoria valiosa para a inovação dos processos gerenciais (FARAH JÚNIOR, 2000). Com o desenvolvimento da ciência da informação, diversas tecnologias surgiram para aumentar a competitividade das operações, incluindo: Desenho Assistido por Computador (*Computer-aided Design* – CAD; Manufatura Assistida por Computador (*Computer-aided Manufacturing* - CAM); Comando Numérico por Computador (CNC); Robótica industrial; Manufatura Integrada por Computador (*Computer-integrated Manufacturing* - CIM), Veículos Guiados Automaticamente (*Automated Guided Vehicle* - AGV); Sistema Flexível de Manufatura (*Flexible Manufacturing System* - FMS), entre outras (COUTINHO, 1992; HEIZER; RENDER, 2001; KAGERMANN *et al.*, 2013).

Finalmente, a quarta revolução industrial ou “**Indústria 4.0**” emerge na virada do Século XXI, com base no aperfeiçoamento tecnológico e nos desdobramentos da revolução digital que tornaram a informática presente no cotidiano da sociedade moderna. Os avanços na internet móvel, a miniaturização e a redução de custos dos sensores, juntamente com a inteligência artificial e a criação de máquinas inteligentes (*machine learning*), permitiram a integração entre *hardware*, *software* e redes (*networks*), caracterizando assim, o fim da terceira revolução industrial (SCHWAB,2017).

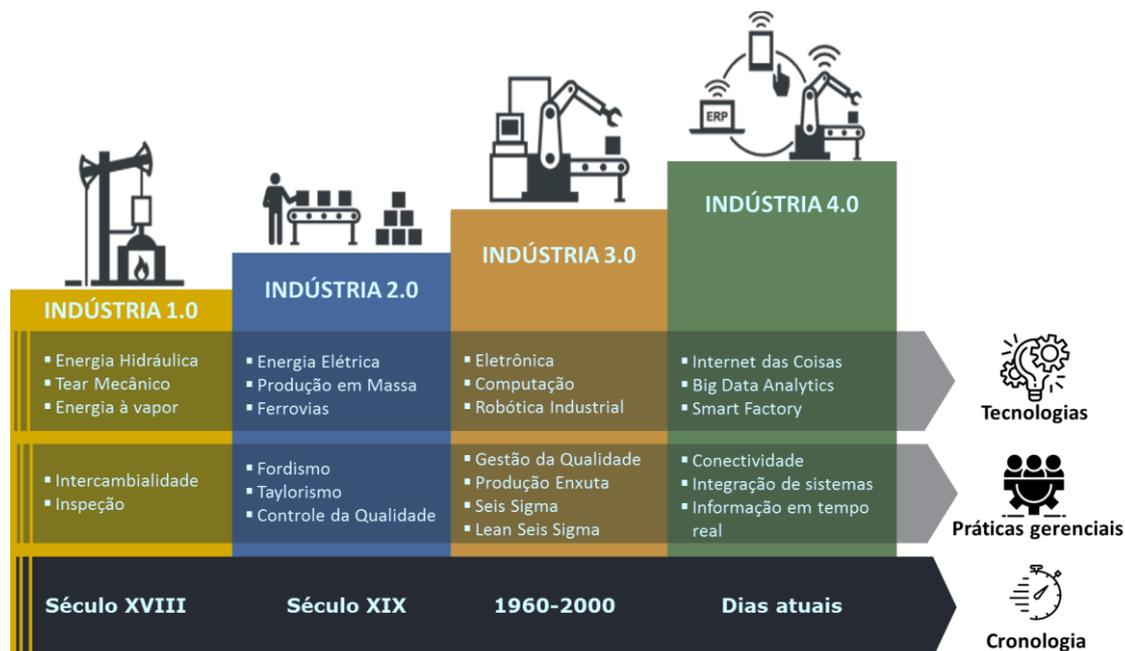
A natureza das transformações inerentes à I4.0 pode ser compreendida observando-se as demandas sociais, econômicas e políticas, como por exemplo, a necessidade de flexibilidade e redução do tempo de desenvolvimento de produtos, a individualização da demanda e a eficiência dos recursos produtivos, assim como a disponibilidade de novas tecnologias de manufatura (*technology-push*), que vêm intensificando a mecanização, automação e digitalização dos processos industriais (LASI *et al.*, 2014).

O termo Indústria 4.0 ganhou notoriedade mundial durante um evento realizado em 2011 em Hannover, na Alemanha, para estimular os negócios em torno das Fábricas Inteligentes e promover os CPS (KAGERMANN *et al.*, 2013; LASI *et al.*, 2014; SANDERS *et al.*, 2016; SCHWAB, 2017). Nesse período, a conjuntura econômica na Alemanha sinalizava ao governo e aos empresários locais alguns desafios frente ao novo cenário tecnológico, resultando em estratégias para liderar o mercado mundial de equipamentos para a manufatura, principalmente com relação a comercialização de sistemas embarcados (KAGERMANN *et al.*, 2013).

Ao contrário da abordagem LSS, o paradigma da quarta revolução industrial ainda não se encontra consolidado em termos conceituais. Para Lasi *et al.*, (2014), a I4.0 descreve um projeto futuro de manufatura, concebido para se adequar à diversas transformações sociais, políticas, econômicas e tecnológicas, tais como a necessidade de redução do tempo de desenvolvimento de produtos, o aumento da demanda por produtos individuais, a flexibilidade da produção, a descentralização na tomada de decisão, o aumento da automação e digitalização dos processos industriais, a integração entre os componentes físicos e digitais, entre outros.

Maximiano (2005) explica que no campo da administração, paradigmas são considerados modelos que abrangem todos os tipos de técnicas e soluções para gerenciar as organizações, permitindo a compreensão do contexto econômico, social e tecnológico dentro do qual as organizações são administradas. A Figura 5 sintetiza os quatro paradigmas industriais destacando os avanços tecnológicos e algumas práticas gerenciais ao longo do tempo, sem a intenção de generalizar o uso dessas tecnologias em um período restrito.

Figura 5 - Evolução dos paradigmas industriais



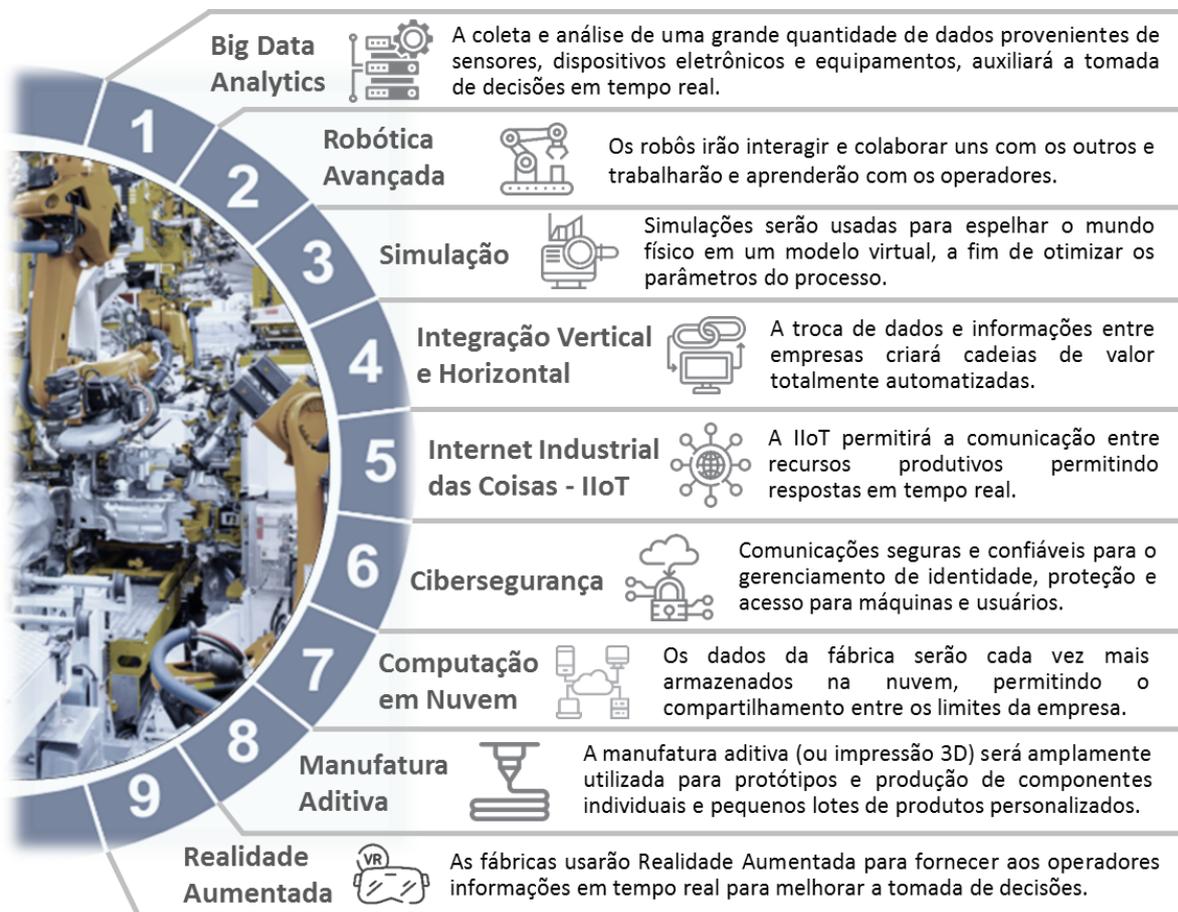
Fonte: Adaptado de Schwab (2017)

## 2.2.2 Tecnologias Habilitadoras

As abordagens e ideias que norteiam a I4.0 abrangem um conjunto multidisciplinar de conhecimentos envolvendo áreas como engenharia elétrica, ciência da computação, administração, sistemas de informação e engenharia mecânica, ampliando o escopo das aplicações das novas tecnologias (LASI *et al.*, 2014). Neste contexto, uma variedade de tecnologias está convergindo para o novo paradigma industrial incluindo inteligência artificial, internet móvel, computação em nuvem, realidade aumenta, simulação, robótica avançada, sensores, manufatura aditiva, nanotecnologia, entre outras (KAGERMANN *et al.*, 2013; MARQUES *et al.*, 2017; KULL, 2015; RÜßMANN *et al.*, 2015; SCHWAB, 2017).

Considerando essa variedade de tecnologias emergentes com profusas aplicações no contexto da manufatura digital, diversos estudos têm utilizado o trabalho desenvolvido pelo Boston Consulting Group - BCG para fazer referência às nove tecnologias habilitadoras da I4.0 (RÜßMANN *et al.*, 2015; BAYGIN *et al.*, 2016). Tais tecnologias são apresentadas na figura 6 e serão brevemente explicadas a seguir.

Figura 6 - As nove tecnologias da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Rüßmann *et al.*, 2015

### 2.2.2.1 Big Data Analytics

Considerando a grande quantidade de dados provenientes de dispositivos, sensores, máquinas e telemetria atualmente à disposição da indústria, torna-se necessário o emprego de técnicas apropriadas para análise de dados estruturados e não estruturados. Neste sentido, o termo *Big Data Analytics* pode ser compreendido como um grande conjunto de dados, geralmente aglomerados em vários petabytes ( $10^{15}$  bytes), que são complexos demais para serem processados e analisados usando os tradicionais métodos de processamento de dados e análise estatística (DAVENPORT; KIM, 2013; HOERL *et al.*, 2014). O estudo sobre as tecnologias *Big Data* em ambientes de manufatura é uma área de pesquisa interdisciplinar relativamente nova que incorpora temas como automação, engenharia, tecnologia da informação e análise de dados (O'DONOVAN *et al.*, 2015).

A definição do termo está diretamente relacionada com certas características que envolvem volume, velocidade, variedade, veracidade, valor e variabilidade de dados (6Vs). A primeira característica diz respeito ao volume na quantidade de dados gerados a cada segundo (LI *et al.*, 2015; BRANDENBURGER *et al.*, 2016), embora seja necessário destacar que quantidade não significa necessariamente qualidade, pois mais importante que *Big Data* é o que se faz com esses dados, ou seja, “*Smart Data*” (MARR, 2015). Velocidade significa que os dados podem ser gerados, armazenados e analisados em tempo real, de modo a otimizar o processo de tomada de decisão (DAVENPORT *et al.*, 2012). Variedade se refere ao grande número de tipos de dados disponíveis, tais como caracteres, áudio, figuras, posições geográficas, entre outros (LI *et al.*, 2015). Veracidade diz respeito à confiabilidade no processo de coleta de dados (DEMCHENKO *et al.*, 2013; MARR, 2015). A ideia de valor se refere aos resultados proporcionados para o negócio por meio do processo de análise dos dados (DEMCHENKO *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2015). Por fim, a variabilidade diz respeito à amplitude de valores observados, visto que uma grande quantidade de dados pode apresentar maior variância do que uma base de dados tradicional (LI *et al.*, 2015).

Para Davenport e Kim (2013), o *Big Data Analytics* promete mudar significativamente a indústria, visto que a maioria das máquinas já tem um ou mais processadores com capacidade de operar esse tipo de tecnologia. Sob a mesma ótica, Laux *et al.*, (2017) salientam que estamos vivendo em uma era caracterizada por uma enxurrada de dados gerados por bilhões de dispositivos ou coisas, que serão processados analiticamente por computadores, permitindo um refinamento e maior eficácia na tomada de decisão.

De modo específico, o termo analítica (*analytics*) é descrito por Baesens (2014) como a identificação de padrões de negócios ou modelos matemáticos de decisão, a partir de um conjunto de dados processados. Davenport e Kim (2013) apresentam dois critérios para classificar esses modelos: (a) **tipo de dados coletados**, podendo ser qualitativo, quando dados não estruturados são coletados e analisados sob amostragem estatística, ou quantitativo, quando se dedicam à investigação empírica sistemática de um fenômeno, por meio de técnicas matemáticas, computacionais ou estatísticas; e (b) **métodos adotados** e seus propósitos, podendo ser: (i) descritivo, quando envolve a coleta, organização, tabulação e apresentação dos dados para exposição do objeto de estudo; (ii) preditivo, quando usa dados do passado para prever o futuro, identificando as associações entre as variáveis de interesse para prever a probabilidade de um fenômeno; e, por fim; (iii) prescritivo, quando inclui métodos para fazer inferências causais ou otimização.

#### 2.2.2.2 Robótica Avançada

O uso de robôs em processos de manufatura vem crescendo nos últimos anos devido à redução de custos desse tipo de tecnologia, que tem se tornado mais flexível para produzir diferentes partes do produto (GILCHRIST, 2016). Além disso, o aperfeiçoamento de sensores conectados aos robôs tem aumentado a capacidade de resposta quanto à variedade de tarefas executadas e permitido o acesso remoto às informações necessárias à operação por meio do armazenamento de dados em nuvem (SCHWAB, 2017). Neste contexto, a ideia de um robô industrial atuando de forma colaborativa com os operadores e auxiliando no desenvolvimento de uma determinada tarefa pode representar uma condição importante para expressar o conceito de fábrica inteligente, onde robôs e humanos trabalharão cada vez mais próximos (KULL, 2015; WEISS *et al.*, 2016; ROBLA-GÓMEZ *et al.*, 2017).

Embora o emprego de robótica em processos de fabricação seja uma característica inerente à terceira revolução industrial, o novo paradigma industrial propõe otimizar esse tipo de tecnologia por meio da evolução dos robôs tradicionais para robôs inteligentes, capazes de aprender e colaborar com os seres humanos. A robótica avançada inerente à I4.0 difere da robótica tradicional principalmente em dois aspectos: autonomia e colaboração com os humanos. Robôs industriais autônomos estão sendo desenvolvidos de modo a aumentar a segurança, flexibilidade, versatilidade e colaboração no chão de fábrica, sem a necessidade de isolar uma área de trabalho (BAHRIN *et al.*, 2016). Tecnologias como inteligência artificial, IIoT, computação em nuvem e *Big Data*, alterarão a aplicação dos robôs nos processos industriais nos próximos anos (ROBLA-GÓMEZ *et al.*, 2017).

A principal vantagem inerente aos Robôs Colaborativos (COBOTs) é que essa tecnologia permite que robôs possam colaborar com humanos em um espaço de trabalho compartilhado, de modo a desempenhar as atividades produtivas com maior produtividade e eficiência (LASOTA; SHAH, 2015). Além disso, os COBOTs também são um recurso alternativo aos convencionais dispositivos de manuseio de materiais, tais como braços articulados, elevadores, garras etc., visto que tais recursos apresentam problemas ergonômicos gerando fadiga ao operador, estresse e distúrbios muscoesqueléticos (ŠURDILOVIĆ *et al.*, 2003; KRÜGER *et al.*, 2006). Os robôs autônomos, por sua vez, têm um importante papel no contexto da fábrica inteligente, não apenas para colaborar com os operadores, mas também para viabilizar a implementação dos CPS por meio do monitoramento em tempo real dos processos, da capacidade de predição e reconfiguração das operações, assim como da otimização do consumo de energia, aumentando a flexibilidade e eficiência da produção (BAYRAM; INCE, 2018).

Além dos aspectos relativos à eficiência industrial, a segurança deve ser prioridade nas estratégias de implementação dos COBOTs. A norma ISO/TS 15066:2016 tem como objetivo atualizar os padrões internacionais de segurança para a adoção da tecnologia, detalhando os requisitos de projeto, avaliação de risco e seus principais impactos para partes específicas do corpo humano. Já é possível evidenciar soluções em segurança na literatura incluindo sistemas de confiabilidade mecânica, estruturas de peso leve, dispositivos de detecção de contato, sistemas de visão artificial etc. (ROBLA-GÓMEZ *et al.*, 2017).

Considerando que o termo “robô” foi definido pelo *The Robot Institute of America* como “*um manipulador reprogramável e multifuncional projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados por meio de vários movimentos programados para o desempenho de uma variedade de tarefas*” (RUSSELL; NORVIG, 1995), as aplicações envolvendo AGVs e drones também podem ser incluídas nesta categoria de tecnologia.

### 2.2.2.3 Simulação

A simulação é geralmente empregada em processos de manufatura para projetar cenários potenciais e antecipar o comportamento futuro para a tomada de decisões, com base em resultados históricos e informações capturadas através de objetos físicos e virtuais (MARQUES *et al.*, 2017). Com o advento da I4.0, a virtualização dos processos permitirá a criação de gêmeos digitais (*digital twins*) para a modelagem e testes de simulação, com o propósito de otimizar a produção e a qualidade do produto (GILCHRIST, 2016).

Esse tipo de tecnologia auxilia na tomada de decisão e pode ser utilizada para explorar dados em tempo real em diversos setores da indústria, desde o planejamento de fábricas, simulação dos processos, treinamento de colaboradores e validação de protótipos (NETTO *et al.*, 1998). A manufatura virtual gerada a partir da simulação pode representar uma grande oportunidade para verificar o desempenho de um sistema que opera em ambientes de alta complexidade e otimizar atividades de grande importância no processo, incluindo troca de ferramentas (*setup*), controle dos níveis de estoque e programação da produção (KULL, 2015).

Com a integração de diversas tecnologias digitais será possível simular todas as etapas do processo de manufatura e compreender sua influência na produção. Isso inclui a simulação dos níveis de estoque, logística, assim como a capacidade de rastrear o histórico do uso dos componentes usados na produção, resultando na redução dos custos e minimização da configuração dos recursos produtivos (KAGERMANN *et al.*, 2013). No futuro, as simulações realizadas no chão de fábrica utilizarão dados em tempo real para espelhar o mundo físico em um modelo virtual, incluindo máquinas, produtos e seres humanos, permitindo que os operadores testem e otimizem as configurações de uma máquina no mundo virtual antes da troca física, reduzindo tempos de *setup* e aumentando a qualidade (RÜßMANN *et al.*, 2015).

#### 2.2.2.4 Integração Vertical e Horizontal

Os conceitos de integração vertical e horizontal estão estreitamente associados com a concepção dos CPS e gestão da cadeia de suprimentos. A integração vertical requer a conexão inteligente e a digitalização das fábricas em diferentes níveis hierárquicos, permitindo a fabricação em pequenos lotes com níveis de lucratividade aceitáveis. A integração horizontal por sua vez, promove a criação de valor entre as organizações para enriquecer o ciclo de vida do produto usando sistemas de informação, gerenciamento financeiro e fluxo eficiente de material. Ambos os conceitos permitem o compartilhamento de dados em tempo real e a produtividade na alocação de recursos, que são fatores cruciais para a I4.0 (KAGERMANN *et al.*, 2013; SALKIN *et al.*, 2018).

Para integrar verticalmente os CPS, as configurações devem ser definidas para cada demanda, de modo a selecionar automaticamente uma estrutura de máquinas no chão de fábrica, abrangendo modelos, dados, comunicação e algoritmos. Por outro lado, a integração horizontal demanda estratégias de negócios envolvendo cadeias de valor suportadas pelos CPS (PÉREZ *et al.*, 2016).

A Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) ou Internet Industrial das Coisas (*Industrial Internet of Things* - IIoT), representa um novo paradigma tecnológico que conecta a rede mundial de computadores com dispositivos e máquinas capazes interagirem entre si (PORTER; HEPPELMANN, 2014; LEE; LEE, 2015; SANDERS *et al.*, 2016). Os dispositivos tecnológicos ou “coisas”, recebem e transmitem dados via internet por meio de computadores, *laptops*, servidores, *smartphones*, *tablets* e uma infinidade de dispositivos (WEINBERG *et al.*, 2015).

As conexões da IIoT são estabelecidas usando um único Protocolo de Internet (IP), que permite a comunicação entre os dispositivos sem a intervenção humana (HUANG; LI, 2010). Um IP pode ser tecnicamente compreendido como um item que: (i) possui uma identidade específica; (ii) é capaz de se comunicar efetivamente com seu ambiente; (iii) pode reter ou armazenar dados sobre si mesmo; (iv) pode utilizar linguagem para exibir seus recursos e requisitos de produção; e (v) é capaz de participar ou tomar decisões relevantes para o seu próprio destino (McFARLANE *et al.*, 2012).

As inovações no campo da IIoT vão além da coleta de informações (sensoriamento) e interação com o mundo físico por meio da atuação, comando e controle, permitindo o uso de diversos padrões para a transferência dos dados tais como *bluetooth*, identificação por radiofrequência (RFID), *WiFi*, telefonia, sensores e atuadores (YAN *et al.*, 2008). No contexto da IIoT, o termo *Machine to Machine* (M2M) é utilizado para descrever as tecnologias que fazem com que um determinado sistema, seja ele *wireless* ou comum, se comunique com outros dispositivos (NICOLETTI, 2013).

Os recentes avanços tecnológicos em sensores inteligentes, comunicação *wireless* e sistemas embarcados têm reduzido significativamente os custos dessas tecnologias, viabilizando a IIoT em processos industriais (MARQUES *et al.*, 2017). Considerando a natureza das operações realizadas em torno da IIoT, a implementação de práticas para assegurar a proteção e acesso aos dados digitais torna-se imprescindível. Neste contexto, as próximas tecnologias abordadas (cibersegurança e computação em nuvem) representam uma condição *sine qua non* para a aplicação da IIoT no âmbito das fábricas inteligentes.

#### 2.2.2.5 Cibersegurança

Conforme apresentado na seção anterior, as inovações no campo da IIoT abrem caminho para a utilização de diversos recursos de conexão do mundo físico ao mundo digital. Considerando os recentes ataques às operações industriais, promovidos por *hackers* ao redor do mundo, a Cibersegurança (*Cyber Security*) representa um importante elemento da I4.0, por lidar com a vulnerabilidade e ameaças inerentes aos sistemas conectados à internet. Neste cenário, a gestão da segurança das informações emerge como assunto de grande relevância para as estratégias de conversão ao modelo I4.0 (GILCHRIST, 2016).

As ameaças e vulnerabilidades presentes na IIoT podem ser associadas com os diferentes níveis de arquitetura adotados para a implementação do sistema. Ervural e Ervural (2018) sugerem um modelo de arquitetura IoT e descrevem as ameaças e vulnerabilidades mais comuns para esse tipo de sistema em torno de quatro níveis hierárquicos (sensoriamento, redes, serviço e aplicação). São elas: acesso não autorizado, confidencialidade, dados com ruídos, códigos maliciosos, ataques de negação de serviço, ameaças na transmissão dos dados, violação e congestionamento de redes, manipulação de dados, entre outras.

De acordo com Kagermann *et al.*, (2013), dentre os objetivos da cibersegurança destacam-se o aumento da confidencialidade, integridade dos dados e disponibilidade das informações no tempo necessário. Para gerenciar a variedade de dispositivos no universo da IIoT, assim como as vulnerabilidades associadas à falta de criptografia e insegurança nas plataformas *web* e nos computadores, Lee e Lee (2015) sugerem a incorporação de soluções em segurança digital dentro de produtos e dispositivos eletrônicos, como por exemplo, sistemas de bloqueio de acesso aos dados e *firewalls*.

#### 2.2.2.6 Computação em Nuvem

O conceito de Computação em Nuvem (*Cloud Computing*) surgiu a partir da evolução dos computadores e dos serviços de infraestrutura em tecnologia da informação (KAGERMANN *et al.*, 2013). Fatores como capacidade de armazenamento, disponibilidade e velocidade de conexão permitem que dados gerados em processos de manufatura sejam rapidamente acessados e analisados em plataformas digitais baseadas em computação em nuvem (LEE; LEE, 2015; KULL, 2015; BARTODZIEJ, 2016). Além disso, o desenvolvimento dessa tecnologia também reduz a necessidade de computadores de alto desempenho e servidores (DEVEZAS *et al.*, 2017).

No contexto dos CPS, Lee (2015) explica que a computação em nuvem deve permitir que o usuário acesse a informação do processo por meio de dispositivos móveis em qualquer lugar e em qualquer tempo. Tal ideia é também sustentada por Ervural e Ervural (2018), que associa a I4.0 com a interconectividade entre as organizações da seguinte forma:

A interconexão fornece um *link* entre parceiros, clientes, funcionários e sistemas para acelerar o desempenho dos negócios e criar oportunidades com a colaboração em uma plataforma compartilhada. A interconexão é um requisito para acesso instantâneo à dados interdependentes e em tempo real entre indústrias ou entre diferentes regiões geográficas. A nuvem industrial fornece uma plataforma comum para armazenar dados e colaborar com usuários de várias localizações (ERVURAL; ERVURAL, 2018, p. 268).

Além da estreita associação com as tecnologias IIoT, Cibersegurança e CPS, a computação em nuvem deve habilitar as aplicações em *Big Data*. Neste sentido, Lee *et al.*, (2014) esclarecem que o gerenciamento dos dados em ambientes *Big Data* é fundamental para alcançar a autoconsciência e autoaprendizagem das máquinas, fazendo com que a flexibilidade e os recursos oferecidos pela computação em nuvem sejam indispensáveis.

#### 2.2.2.7 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (*additive manufacturing*) ou “impressão 3D” é uma tecnologia de processamento empregada no contexto da manufatura avançada, capaz de produzir partes de um produto ou componentes que auxiliam o processo de fabricação, incluindo elementos de máquinas, gabaritos e protótipos (KULL, 2015). A partir de um objeto gerado por computador (imagem ou desenho), a impressão 3D é capaz de reproduzir esse objeto em camadas tridimensionais utilizando diversas técnicas e materiais (GILCHRIST, 2016).

Estão entre os principais benefícios da manufatura aditiva: diminuição dos desperdícios de produção; redução do tempo de fabricação de protótipos; eliminação de custos com *setup*; simplificação da manufatura; e redução de mão de obra. Contudo, a tecnologia também apresenta algumas restrições incluindo limitações na dimensão dos produtos, imperfeições de superfície que podem requerer outros estágios de processamento, assim como a atual incapacidade para a produção em massa (BEYCA *et al.*, 2018).

De acordo com Chen e Lin (2017), a manufatura aditiva é capaz de produzir itens usando uma variedade de materiais, tais como resina plástica, cerâmica, vidro, gesso, areia e metal, sendo que os dois últimos têm maior procura no mercado comercial. Cooper e Wachter (2014) entendem que a atratividade da manufatura aditiva é a capacidade de produzir rapidamente objetos complexos sem a necessidade de montagens, ferramentas e intervenção humana, assim como a capacidade de produzir sobressalentes para a manutenção industrial.

A manufatura aditiva emprega diversas técnicas para a obtenção do protótipo ou material impresso, tais como estereolitografia, geralmente utilizada para a prototipagem rápida, impressão tridimensional (3DP), modelagem de deposição fundida, sinterização seletiva a laser, onde o material é fundido por meio da adição de dióxido de carbono, fabricação de objetos laminados e modelagem de rede projetada por laser, onde o metal em pó é derretido e injetado para a construção da peça 3D (BEYCA *et al.*, 2018). No contexto da I4.0, esses métodos serão amplamente utilizados para a produção customizada em pequenos lotes, oferecendo como vantagens, a facilidade de produção, redução das distâncias de transporte, descentralização, redução de estoque em processo e alto desempenho (RÜßMANN *et al.*, 2015).

#### 2.2.2.8 Realidade Aumentada

A realidade aumentada (*augmented reality*) pode ser compreendida como uma extensão da percepção da realidade por meio da sobreposição de objetos virtuais com a realidade auxiliada por computador e dispositivos visuais como câmeras de *smartphones*, visores montados na cabeça *Head-Mounted Displays – HMD*, equipamentos de projeção de imagens, entre outros. (SCHMITT *et al.*, 2013; ESENGÜN; İNCE, 2018).

Ao contrário da realidade virtual, que cria um ambiente totalmente artificial, a realidade aumentada permite a integração das informações digitais em ambientes reais de manufatura para melhorar a tomada de decisão. De acordo com Esengün e İnce (2018), essa tecnologia tem sido usada para melhorar os processos de fabricação, ajudando na solução de problemas críticos ou evitando subsequentes retrabalhos e modificações nas atividades.

Alguns estudos corroboram a eficácia deste tipo de tecnologia para a otimização dos processos de manufatura. Para Carpanzano *et al.*, (2018), a realidade aumentada, juntamente com a tecnologia *touch*, promovem a interação homem-máquina e podem ser utilizadas para melhorar a produtividade do operador. Pfeiffer *et al.*, (2016) por sua vez, demonstram que alguns dispositivos de realidade aumentada são capazes de confrontar a execução de trabalhos executados por operadores com protótipos ou padrões virtuais. Por fim, Gilchrist (2016) salienta que esse tipo de tecnologia vem sendo aplicada principalmente em atividades de manutenção e treinamento, com o propósito de reduzir custos operacionais.

### 2.2.3 Especificidades da Indústria 4.0

Kagermann *et al.*, (2013) afirmam que um dos grandes desafios da I4.0 será a criação de redes integradas horizontalmente ao longo de toda a cadeia de valor, por meio de projetos de sistemas de manufatura integrados verticalmente. Vários autores destacam quatro especificidades inerentes ao modelo I4.0 (KAGERMANN *et al.*, 2013; BARTODZIEJ, 2016; GILCHRIST, 2016; PÉREZ *et al.*, 2016; QIN *et al.*, 2016; HOFMANN; RÜSCH, 2017; LIU; XU, 2017; WAGNER *et al.* 2017). São elas:

- **Integração Vertical** de fábricas inteligentes que utilizam CPS para planejar e controlar as atividades produtivas de forma autônoma. Essa integração é capaz de gerar uma grande quantidade de dados que demandará soluções em computação em nuvem e análise de *Big Data*, a fim de otimizar os processos de fabricação;
- **Integração Horizontal** para viabilizar a colaboração entre empresas ou “elos” da cadeia de valor, onde a rastreabilidade do produto poderá ser feita em tempo real e com maior transparência, melhorando assim o controle da produção ao longo de toda a cadeia de suprimentos;
- **Novas Soluções em Engenharia** por toda a Cadeia de Valor, cobrindo desde as etapas de projeto e desenvolvimento até a manufatura de produtos customizados;
- **Aceleração tecnológica** que poderá reduzir significativamente os custos de produção e aumentar a flexibilidade dos processos de manufatura. Inteligência artificial, manufatura aditiva, robótica e uso de nano sensores são alguns exemplos de tecnologias exponenciais empregadas na I4.0.

A fábrica inteligente pode ser definida como “*uma aplicação intensiva de dados de tecnologia da informação no nível da fábrica e acima para permitir operações inteligentes, eficientes e responsivas*” (WALLACE; RIDDICK, 2013). No âmbito da I4.0, este modelo de manufatura é caracterizado pelo uso de CPS capazes de promover uma conexão eficaz entre máquinas, robôs, sensores, pessoas, produtos, veículos de transporte e computadores com o objetivo de melhorar a produção e atender à crescente demanda por customização em massa (KAGERMANN *et al.*, 2013; GUO *et al.*, 2014; TANG *et al.*, 2016; MARQUES *et al.*, 2017). Deste modo, é possível compreender a fábrica inteligente como um sistema de manufatura capaz de integrar todas as tecnologias I4.0 visando a eficiência da produção.

A fábrica inteligente também deverá ser capaz de lidar com turbulências na produção usando estruturas de comunicação e informação descentralizada, com as seguintes especificidades (LUCKE *et al.*, 2008; ZUEHLKE, 2010; SCHMITT *et al.*, 2013):

- Identificação de objetos por meio de tecnologias do tipo *tags*, sensores e leitores adaptados para o ambiente industrial;
- Sistema de posicionamento e reconhecimento da localização dos objetos (como por exemplo, ferramentas e materiais) para a redução de tempos ociosos;
- Acompanhamento e atualização das informações sobre o *status* do processo ou localização de objetos em tempo real;
- Sistemas embarcados com baixo consumo de energia integrados a dispositivos móveis.
- Comunicação *wireless* entre as tecnologias e objetos;
- Tecnologias de identificação automática de objetos como código de barras e dispositivos RFID;
- Sistemas para conectar diferentes sensores no chão de fábrica.

Os CPS por sua vez, podem ser definidos como sistemas inteligentes que englobam *hardware*, *software*, e componentes físicos e computacionais adequadamente integrados para detectar e controlar as mudanças necessárias em tempo real, envolvendo alto grau de complexidade em escalas espaciais e temporais para integrar seus componentes computacionais e físicos (PFEIFFER *et al.*, 2016; COLOMBO *et al.*, 2017). Tais sistemas podem ser melhor compreendidos, quando analisados sob três categorias (WAGNER *et al.* 2017):

- **Aquisição e processamento de dados:** aplicação de sensores, dispositivos microeletrônicos e atuadores para conectar o mundo físico com sistemas informatizados em um ambiente de rede (IoT), com possibilidade de gerar e armazenar uma grande quantidade de dados (*Big Data*) em nuvem, para posterior análise;
- **Comunicação *Machine-to-Machine* (M2M):** combinação do conceito de integração vertical, que conecta dados e máquinas em diferentes níveis ou “camadas”, com o conceito de integração horizontal, que viabiliza a comunicação entre máquinas na cadeia produtiva de forma autônoma.
- **Interação Homem-máquina (IHM):** comunicação e colaboração entre máquinas e pessoas por meio de tecnologias como robótica, realidade virtual ou realidade aumentada.

Uma forma de analisar o funcionamento dos CPS é compreender sua arquitetura. Contudo, no contexto da I4.0, o termo “arquitetura” possui várias definições, tais como arquitetura conceitual, geral ou referencial, que fornece diretrizes para o desenvolvimento de um sistema ou de arquitetura específica, que apresenta uma descrição detalhada do sistema (características funcionais e técnicas) especificando as tecnologias-chave necessárias para atender as necessidades funcionais do sistema (MA *et al.*, 2017). Apesar de compartilharem o mesmo tipo de arquitetura da IIoT, os CPS apresentam elevado grau de combinação e coordenação dos elementos computacionais e físicos, controlados por entidades físicas por meio de algoritmos, sensores e plataformas em nuvem (GONÇALVES *et al.*, 2017).

Colombo *et al.*, (2017) afirmam que o desempenho dos CPS depende principalmente da capacidade de coletar, analisar e usar dados e informações digitalizadas em larga escala para o gerenciamento sustentável e eficiente da fábrica em termos de controle, monitoramento, diagnóstico e manutenção. Ao comparar a IoT com os CPS, Pérez *et al.*, (2016) esclarecem que, enquanto a IoT se refere a uma estrutura que coleta e controla informações vindas de várias “coisas” no espaço físico, os CPS criam sinergia entre as entidades físicas e digitais.

Considerando que o conceito de CPS se insere na concepção das fábricas inteligentes, torna-se necessário compreender “como” a junção entre os mundos físico e virtual pode ser operacionalizada em um sistema integrado. Neste contexto, diversos autores fazem referência ao clássico modelo de pirâmide de automação, a qual é estruturada a partir de níveis hierárquicos que se inicia pela conexão dos sensores, até chegar no nível de controle empresarial (BRETTEL *et al.*, 2014; RÜßMANN *et al.*, 2015; BARTODZIEJ, 2016; GILCHRIST, 2016; MARQUES *et al.*, 2017). Há também autores que sugerem a estrutura piramidal conhecida como “5C”, que classifica os níveis de automação dos CPS, a partir de cinco níveis hierárquicos: (i) nível de conexão, (ii) nível de conversão, (iii) nível cibernético, (iv) nível de cognição, e (v) nível de configuração (LEE, 2015; QIN *et al.*, 2016).

Outra importante especificidade da I4.0 diz respeito às competências necessárias para viabilizar a operação dos CPS no chão de fábrica, assim como aos novos conhecimentos e habilidades para trabalhar com as tecnologias habilitadoras. Neste novo cenário, as organizações deverão atualizar sua infraestrutura tecnológica de modo que ela seja rápida, segura e confiável o suficiente para se adequar aos requisitos técnicos necessários, bem como adaptar seus planos de desenvolvimento de competências com novas habilidades em tecnologia de informação e outras tecnologias inerentes (RÜßMANN *et al.*, 2015).

Considerando a nova geração de máquinas e recursos de TI presentes na era da I4.0, as habilidades e competências emergentes poderão incluir diferentes formas de comunicação *online* e em tempo real, domínio para trabalhar com técnicas e ferramentas dedicadas à análise de dados, tais como *Big Data Analytics*, análise preditiva, *data-mining* e *machine learning*, novas relações com a tecnologia, como por exemplo a IHM, assim como a versatilidade para lidar com as novas tecnologias digitais (SUSSKIND; SUSSKIND, 2015).

A literatura sobre a I4.0 também apresenta estudos norteados para o preenchimento de lacunas de competências que surgiram frente ao novo paradigma industrial. Como exemplo, o termo “*operator 4.0*” pode ser usado para denominar um operador inteligente e habilidoso que realiza não apenas o trabalho cooperativo com robôs, mas também o trabalho auxiliado por máquinas, CPS, tecnologias de IHM e automação adaptativa (ROMERO *et al.*, 2016). Outros autores têm desenvolvido estudos voltados à disseminação de conceitos sobre os temas *Smart Factory* e I4.0 no ensino superior (BAYGIN *et al.*, 2016; ELEFTHERIADIS; MYKLEBUST, 2016; EROL *et al.*, 2016).

Estudos que versam sobre modelos de maturidade, desenvolvidos principalmente com base no emprego das tecnologias I4.0 e níveis de integração vertical e horizontal, também se encontram presentes na literatura. Como exemplo, Leyh *et al.*, (2016) desenvolveram um modelo denominado SIMMI (*System Integration Maturity Model Industry 4.0*), estruturado a partir de quatro dimensões (integração vertical, integração horizontal, desenvolvimento de produtos digitais e extensão de uso de tecnologias) e cinco estágios de maturidade, que se inicia no estágio de digitalização básica até a digitalização totalmente otimizada envolvendo soluções *end-to-end*.

O modelo de maturidade para a Indústria 4.0 da ACATECH (*Industrie 4.0 Maturity Index*) fornece orientações práticas em termos de pontos fracos e oportunidades para o desenvolvimento de ações voltadas para a transformação digital (ou I4.0). De acordo com Schuh *et al.*, (2017), esse modelo busca o alinhamento com a estratégia organizacional e reflete os índices de maturidade da organização por meio de seis estágios evolutivos: (i) informatização; (ii) conectividade; (iii) visibilidade; (iv) transparência; (v) predição; e (vi) adaptabilidade. A avaliação desses estágios é organizada em torno de quatro áreas principais (recursos, sistemas de informação, estrutura organizacional e cultura organizacional).

O Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (*Reference Architecture Model Industrie 4.0 - RAMI 4.0*) oferece um guia para a conversão à I4.0, de acordo com os padrões IEC 62264 e 61512 (ADOLPHS *et al.*, 2015; KOLBERG *et al.*, 2017; MA *et al.*, 2017). Este referencial se difere das outras estruturas hierárquicas por apresentar um sistema tridimensional que integra todas as tecnologias e conceitos da I4.0 a partir das camadas gerenciáveis do sistema, do ciclo de vida do produto e seu fluxo de valor, assim como dos níveis hierárquicos para a automação da fábrica.

Publicado em 2015 pela Associação Alemã de Fabricantes de Máquinas e Instalações Industriais (VDMA), o modelo de maturidade *IMPULS* foi desenvolvido com o propósito de preparar as empresas alemãs para a transformação digital. Lichtblau *et al.*, (2015) explicam que, embora seja aplicável a qualquer tipo de organização industrial, esse modelo é direcionado para empresas de médio porte que atuam principalmente nos seguimentos de engenharia mecânica, engenharia industrial e tecnologia da informação, onde a maturidade das empresas é classificada em três categorias: “iniciantes”, “aprendizes” e “líderes”. Essa classificação é obtida a partir de seis dimensões de avaliação da maturidade na implementação da I4.0: (i) Estratégia e Organização; (ii) Fábrica Inteligente; (iii) Operações Inteligentes; (iv) Produtos Inteligentes; (v) Serviços Orientados a Dados; e (vi) Colaboradores.

Schumacher *et al.*, (2016) propõem outro modelo de maturidade que inclui sessenta e dois itens de avaliação distribuídos em nove dimensões organizacionais que resultam em cinco estágios evolutivos, sendo que o primeiro nível descreve a total falta de aderência ao modelo de I4.0 e o quinto nível representa o estado da arte dos requisitos inerentes ao modelo.

Por fim, no estudo publicado por Müller *et al.*, (2018), os autores desenvolvem uma classificação dos níveis de maturidade em relação à implementação da I4.0 para pequenas e médias empresas. Tal classificação permite um posicionamento da empresa avaliada em quatro categorias: (i) *Craft manufacturers*, que denota as empresas sem evidências de transformação digital e elevado nível de trabalho humano, no qual o emprego de recursos produtivos envolve pouca automação; (ii) *Preliminary stage planners*, que caracteriza as empresas com potencial para a transformação digital a médio e a longo prazo (aproximadamente 15 anos); (iii) *Users in value creation*, que enquadra as empresas cujos processos de manufatura apresentem ganhos de eficiência por meio de tecnologias de automação, digitalização e conectividade, assim como interação de dados com clientes e fornecedores; e (iv) *Full-scale adopters*, que caracteriza as empresas líderes em seus seguimentos, onde essa posição é determinada com base no alto grau de automação de seus processos e capacidade de transferência de *know-how* tecnológico a outras empresas.

### 3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Esta seção é dedicada aos aspectos metodológicos com o intuito de esclarecer a concepção metodológica e abordagem de pesquisa escolhidas para a construção da tese. Também apresenta a fundamentação da escolha pelo método de pesquisa e o delineamento da estratégia para a coleta e análise dos dados. Tais procedimentos buscam responder às questões de pesquisas apresentadas na introdução deste trabalho.

#### 3.1 CONCEPÇÃO METODOLÓGICA E ABORDAGEM DE PESQUISA

A ideia de que a ciência deve ser objetiva e que as teorias emanam de um rigoroso processo de obtenção de dados, observação e experimentação tornou-se popular a partir da revolução científica conduzida no século XVII por cientistas como Galileu e Newton (CHALMERS, 1993). O propósito da explicação científica é “*a busca de afirmações e teorias universais, cujo campo de aplicação seja o maior possível*” (MATALLO, 2000). Neste sentido, o indutivismo se fundamenta na capacidade de generalização a partir das observações feitas durante a pesquisa. Contudo, esta concepção metodológica tem recebido críticas principalmente com relação ao princípio da indução, que sustenta a generalização criteriosa observações a partir de muitos registros (CHALMERS, 1993; MARTINS 2012a).

Por outro lado, o filósofo húngaro Imre Lakatos propôs que a pesquisa científica deveria engendrar “programas de pesquisa”, a fim de consolidar a teoria e contribuir para sua própria superação, promovendo assim, o desenvolvimento do conhecimento (MATALLO, 2000). Desta forma, considerando que a concepção metodológica deve estar de acordo com os objetivos da pesquisa, o presente trabalho encontra-se alinhado aos **programas de pesquisa**, visto que existem importantes comunidades científicas dedicadas à abordagem LSS (*America Society for Quality – ASQ, Union of Japanese Scientists and Engineers - JUSE, Utah State University, The University of Alabama, Università dei Roma*, entre outras), assim como o fato de que o estado da arte sobre essas práticas encontra-se bem estruturado em termos conceituais, com diversas publicações consolidadas em torno do tema<sup>1</sup>. Deste modo, a pesquisa não buscar criar generalizações a partir de uma grande quantidade de observações, como ocorre na proposta indutivista, nem pretende falsificar os pressupostos já estabelecidos em torno do tema.

---

<sup>1</sup> No início desta pesquisa, aproximadamente 7.094 artigos foram recuperados nas principais bases de dados que abordam o tema LSS, sendo 1.874 artigos encontrados na base Web of Science e 5.220 artigos na base Scopus, todos publicados entre o período de 2002 a 2017. A pesquisa foi realizada por meio do termo de busca (“*lean manufacturing*” OR “*six sigma*” OR “*lean six sigma*” OR “*DMAIC*”) AND (“*manufacturing*” OR “*industry*”).

Visto que o principal objetivo desta tese é analisar os pontos de convergência entre tecnologias I4.0 e práticas LSS em processos de manufatura, espera-se que este estudo possa contribuir com suposições complementares ao estado da arte inerente à temática LSS ao criar possibilidades de integração com as tecnologias I4.0, expandindo assim, o núcleo do conhecimento consolidado sobre o tema.

Quanto às abordagens de pesquisa, estas podem ser caracterizadas como quantitativa, qualitativa ou combinada. Na pesquisa qualitativa, o pesquisador descreve cenários, analisa dados para identificar temas ou categorias e filtra os dados através de uma lente pessoal por meio de uma perspectiva construtivista (CRESWELL, 2007). Por outro lado, a geração de dados para testar hipóteses representa o ponto central da abordagem quantitativa, que possui como características a mensurabilidade das variáveis de pesquisa, as relações de causalidade entre as variáveis dependentes e independentes, a capacidade de generalização e a possibilidade de replicação dos resultados para a população de interesse (BRYMAN, 1989).

A combinação entre as duas abordagens resulta na pesquisa combinada, onde a coleta de dados envolve tanto a obtenção de informações numéricas, que podem ser extraídas por meio de um questionário, como informações textuais na forma de entrevista, de modo que o banco de dados final apresente tanto informações quantitativas como qualitativas (CRESWELL, 2007). Entende-se que esta tese seguiu a abordagem de pesquisa combinada, por recorrer a técnicas quantitativas voltadas para o direcionamento e análise complementar das informações obtidas, bem como a técnicas qualitativas empregadas para captar a percepção dos entrevistados a respeito da aplicabilidade da estrutura de análise da pesquisa no contexto organizacional.

### 3.2 MÉTODO DE PESQUISA

Dentre os métodos de pesquisa empregados em estudos voltados à gestão da produção e operações, destacam-se os levantamentos do tipo *survey*, estudos de caso, modelagem, simulação, estudos de campo, pesquisa-ação, experimento e estudos teóricos ou conceituais (BRYMAN, 1989; FILIPPINI, 1997; NAKANO, 2010). Sabendo-se que a escolha do método deve estar alinhada com o objetivo do estudo e com as questões de pesquisa formuladas para a geração do conhecimento (YIN, 2009; CANIATO *et al.*, 2018), o estudo de caso múltiplo foi o método escolhido para esta pesquisa. Tal escolha pode ser justificada por meio de três aspectos: (i) classificação do método quanto à natureza da pesquisa; (ii) justificativa da escolha do método comparando o estudo de caso com outros métodos de pesquisa; e (iii) classificação do método quanto ao objetivo do estudo.

Os métodos de pesquisa de campo empregados em estudos nas áreas de engenharia e administração podem ser classificados como **descritivos**, quando o pesquisador busca compreender as características de um determinado fenômeno e fazer associações entre variáveis com base em evidências de pesquisa, **exploratórios**, quando o propósito da pesquisa é levantar questões para a formulação de hipóteses e também para modificar ou clarificar conceitos em estudos futuros, e **explanatórios**, quando se pretende testar hipóteses a respeito de relações de tipo causa-efeito (LAKATOS; MARCONI, 2001; DRESCH *et al.*, 2015).

Assim, entende-se que este estudo é de natureza descritiva, visto que a pesquisa tem como propósito descrever um fenômeno específico (interação entre as tecnologias I4.0 e práticas LSS em processos de manufatura) sem a interferência do pesquisador no processo organizacional. Contudo, o estudo também buscou aumentar a familiaridade com um tema de pesquisa ainda incipiente na comunidade científica, por meio de observações empíricas, o que pode caracterizar a pesquisa como exploratória. Sob esse aspecto, Selltiz *et al.*, (1975) esclarecem que a pesquisa exploratória deve incluir: (i) levantamento bibliográfico inicial; (ii) entrevistas envolvendo participantes com experiência sobre o problema de pesquisa; e (iii) compreensão do problema de pesquisa por meio de exemplos práticos.

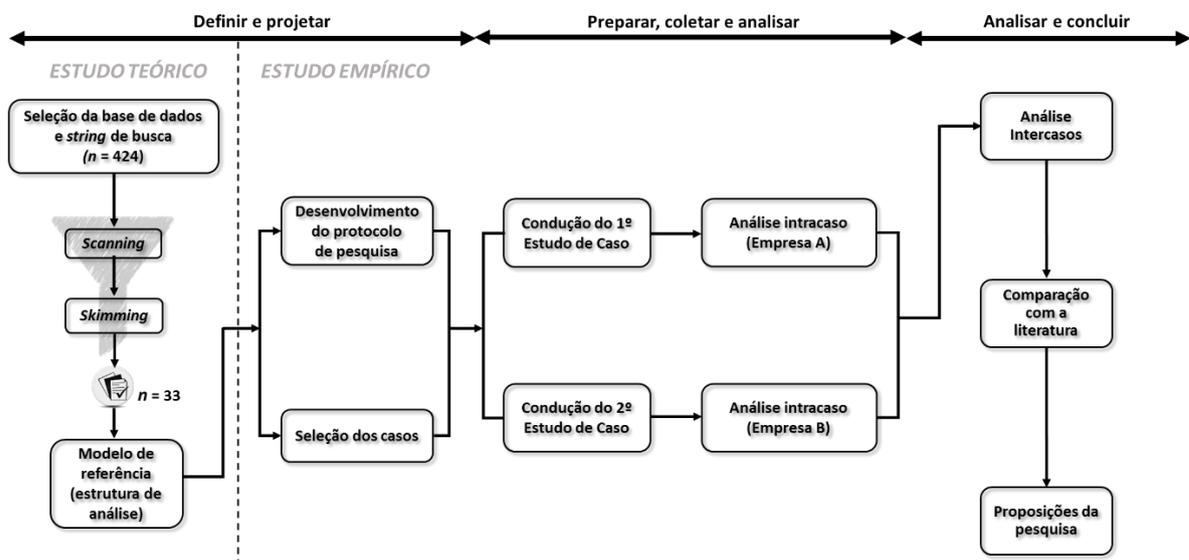
Sob o ponto de vista dos tipos de métodos, a abordagem qualitativa empregada em estudos organizacionais oferece como métodos de pesquisa o estudo de caso e a pesquisa-ação (BRYMAN, 1989; ROESCH, 2006; MARTINS 2012b). Contudo, esta última, apresenta como característica principal, a participação do pesquisador no desenvolvimento de um diagnóstico ou de uma solução para um problema particular (BRYMAN, 1989). Tal característica se mostra inadequada para o propósito deste estudo, visto que a participação do pesquisador se limitou à coleta e análise dos dados internos, sem a indução de mudanças nos processos investigados.

Por outro lado, os métodos voltados à abordagem quantitativa (*survey*, experimentos e simulação), se mostram inadequados ao estudo, por apresentar como principais características, a mensuração de variáveis de pesquisa para a generalização dos resultados a partir de uma amostra significativa da população de interesse ou a busca de relações de causa e efeito em determinados processos. Embora a conversão para o modelo de manufatura digital seja uma tendência na indústria mundial, a adoção das tecnologias I4.0 em processos de manufatura ainda não atingiu um grau de maturidade suficiente para torná-la comum às organizações (QIN *et al.*, 2016; AZEVEDO, 2017). Neste sentido, por envolver um tema ainda incipiente no meio empresarial, a condução de estudos de levantamento do tipo *survey* para a análise das interações entre as tecnologias I4.0 e práticas LSS poderia apresentar riscos quanto à falta de confiabilidade na interpretação dos constructos ou consenso por parte dos entrevistados.

A escolha do estudo de caso como método também pode ser justificada quanto ao objetivo da pesquisa, visto que esse método é recomendado para estudos que tenham como características: (i) a necessidade de encontrar respostas às questões “como” e “por que”, (ii) pouco ou nenhum controle sobre o evento por parte do pesquisador; e (iii) foco em problemas contemporâneos dentro de um contexto real (YIN, 2009). Além de oferecer respostas às questões “como” e “por que”, os estudos de caso também são particularmente adequados para o desenvolvimento de novas teorias e ideias, podendo ser usados para testar e refinar uma teoria e oferecer validade com praticantes (VOSS *et al.*, 2002).

Diversos modelos para a condução de estudos de caso podem ser encontrados na literatura (VOSS *et al.*, 2002; YIN, 2009; MIGUEL; SOUZA, 2012; DRESCH *et al.*, 2015; CANIATO *et al.*, 2018). Os procedimentos para o planejamento, execução e análise dos estudos de caso presentes nesta tese foram baseados no modelo proposto Yin (2009), ilustrado na Figura 7. As etapas que compreenderam o método de pesquisa serão detalhadas nos tópicos a seguir.

Figura 7 - Método do Estudo de caso



Fonte: Adaptado de Yin (2009)

### 3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura

De acordo com Eisenhardt (1989), a definição das questões de pesquisa e a especificação dos constructos, representam um ponto de partida para a construção da teoria inerente aos estudos de caso. Conforme apresentado na introdução deste trabalho, a primeira questão de pesquisa buscou encontrar resposta sobre “*Quais são os pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e as práticas LSS*”. Desta forma, partindo do princípio de que o desenvolvimento da teoria deve anteceder a definição dos procedimentos operacionais da pesquisa de campo, optou-se por proceder uma RSL.

O objetivo de uma RSL é compreender o estado da arte em determinada área do conhecimento, resultando na construção de modelos conceituais de pesquisa (ROWLEY; SLACK, 2004). Conforme ilustrado na Figura 7, o estudo teórico por meio da RSL foi iniciado com a seleção das bases de dados (Scopus® e Web of Science™). O critério para a escolha por essas bases indexadoras considerou a relevância dos artigos publicados em periódicos com fator de impacto, bem como a facilidade para acessar e manipular os registros por meio de mineração de dados.

O procedimento de busca seguiu a lógica booleana por meio da *string*: (“*industry 4.0*” OR “*manufacturing 4.0*” OR “*advanced manufacturing*” OR “*fourth industrial revolution*”) AND (“*lean six sigma*” OR “*six sigma*” OR “*lean*” OR “*DMAIC*”). É importante destacar que diversos termos diretamente relacionados às tecnologias habilitadoras da I4.0, como por exemplo, IIoT, robótica avançada, *Big Data Analytics*, entre outras, não foram inseridas na *string* devido a sua multidisciplinaridade. Desta forma, optou-se por direcionar a busca para estudos contextualizados com o quarto paradigma industrial, cuja teoria reunisse essas tecnologias em uma perspectiva de gestão e digitalização dos processos de manufatura.

Foram recuperados 424 registros na forma de artigos de periódicos e conferências internacionais publicados entre 2011 e 2019, sendo 243 publicações na base Scopus e 181 publicações na base Web of Science, todas no idioma inglês. Esse período foi estabelecido com base no *background* teórico que aponta o ano de 2011 como origem do termo “Indústria 4.0”.

Os arquivos com os metadados foram extraídos das bases de dados e manipulados por meio do *software* SciMat (versão 1.1.04). Após a remoção de 133 arquivos duplicados, os 291 artigos restantes foram filtrados por meio da leitura dos títulos e resumos (*scanning*), de acordo com a aderência aos objetivos da pesquisa. Esse procedimento reduziu a amostra para 125 publicações. Em seguida, aplicou-se um segundo filtro por meio da leitura completa dos artigos (*skimming*), cujo propósito foi encontrar evidências de aplicações das tecnologias I4.0 em

práticas LSS. Esse procedimento resultou na exclusão de 99 artigos que não apresentaram informações diretamente relacionadas ao estudo. A leitura e análise dos 26 artigos selecionados permitiu a identificação de mais sete trabalhos não recuperados na busca inicial, mas que foram posteriormente inseridos na amostra final. Dessa forma, a RSL reuniu 33 artigos cujas contribuições são apresentadas na seção 4.1.

### **3.2.2 Protocolo de Pesquisa**

O protocolo de pesquisa não deve ser compreendido apenas como um questionário a ser preenchido pelos participantes da pesquisa e sim um instrumento para assegurar a confiabilidade e a validade dos dados coletados. Sob essa ótica, Yin (2009) apresenta três características desse instrumento de pesquisa: (i) o protocolo contém o instrumento, os procedimentos e as regras gerais para a condução da pesquisa; (ii) o protocolo destina-se a orientar o investigador na realização da coleta de dados a partir de um único caso (mesmo que o caso específico seja um dos vários em um caso múltiplo); e (iii) o protocolo é aplicável a qualquer circunstância, mas é essencial em estudos de casos múltiplos.

Voss *et al.*, (2002) afirmam que o protocolo de pesquisa deve esclarecer sobre os assuntos que serão abordados nas entrevistas, apresentar as questões que deverão ser respondidas e especificar os dados que deverão ser coletados. O Apêndice A apresenta o protocolo de pesquisa utilizado para nortear a condução dos estudos de caso. Este documento foi estruturado de acordo com os componentes da pesquisa: (i) questões de pesquisa; (ii) objetivos da pesquisa; (iii) critério de seleção das empresas; (iv) referencial teórico; (v) procedimentos para a coleta de dados; (vi) procedimentos para a análise de dados; e (vii) relatório de estudo de caso.

### **3.2.3 Seleção de Casos e Unidades de Análise**

A condução de estudos de caso pode incluir estudos únicos ou múltiplos e a seleção entre uma ou outra modalidade pode resultar em um conflito de escolha (*trade-off*). Estudos de caso único apresentam como vantagem a investigação em profundidade, mas têm como limitação a redução da validade externa, ou incapacidade de generalização por se tratar de um evento único. Por outro lado, os estudos de caso múltiplos, embora ofereçam maior grau de generalização, implicam menor profundidade por caso estudado e podem requerer mais recursos (VOSS *et al.*, 2002; YIN *et al.*, 2009; CANIATO *et al.*, 2018).

Além da quantidade de casos estabelecidos para a pesquisa, também é importante observar o tipo de investigação aplicada, que pode ser do tipo *longitudinal*, quando se pretende investigar o fenômeno de interesse no presente, ou *retrospectivo*, quando se deseja investigar arquivos ou dados para se compreender eventos históricos (VOSS *et al.*, 2002). Tais considerações esclarecem que o estudo de caso único é inadequado aos objetivos desta tese por não permitir a confrontação de resultados em organizações diferentes, reduzindo assim a capacidade de avaliação sobre o grau de aderência à estrutura de análise da pesquisa. Desta forma, entende-se que o estudo de caso múltiplo e longitudinal se mostrou mais adequado a este estudo por ser capaz de confrontar diferentes exemplos de interações entre tecnologias I4.0 e práticas LSS explorando um recente processo de mudança na organização.

Uma importante consideração a respeito da seleção de casos remete à definição do número de empresas ou casos escolhidos. Diferentemente de métodos que empregam inferência estatística, onde a definição de uma amostra representativa da população de interesse é uma condição indispensável para a generalização dos resultados, o uso de critérios de amostragem para estudos de caso é uma prática incomum (EISENHARDT, 1989).

De acordo com Corbin e Strauss (1990) a representatividade e consistência da amostra em estudos qualitativos para a construção da teoria estão mais relacionadas para conceitos ao invés de um número específico de pessoas ou empresas, visto que o objetivo desses estudos não é a generalização dos resultados para uma população de interesse, mas o entendimento desses conceitos, suas propriedades, dimensões e variações. Na visão de Yin (2009), enquanto o método *survey* depende de generalização estatística, o estudo de caso depende de generalização analítica.

Diante dessas considerações, observa-se que a definição da amostra em estudos qualitativos está mais direcionada para as possibilidades de análise seguindo as proposições do estudo ao invés da determinação de um número específico a ser alcançado. Neste sentido, Caniato *et al.*, (2018) revelam três critérios analíticos para a seleção de casos que incluem a possibilidade de replicação teórica, o estudo de um determinado fenômeno com possibilidades de novos *insights* e a possibilidade de confrontar casos com desempenho opostos.

Assim, de acordo com as questões de pesquisa estabelecidas neste estudo, a seleção de casos considerou a possibilidade de replicação teórica a respeito da interação entre as tecnologias I4.0 e práticas LSS em processos de manufatura. Neste sentido, os critérios para a seleção das empresas envolvidas na pesquisa incluíram:

- a) **Empresas de médio e grande porte.** Até o momento, as empresas de pequeno porte não têm se destacado em estágios avançados de estratégias de conversão para o modelo I4.0, quando comparadas às empresas de médio e grande porte (KAGERMANN *et al.*, 2013; LEYH *et al.*, 2016; SCHUMACHER *et al.*, 2016).
- b) **Processos de manufatura.** Sabendo que a aplicação das tecnologias da I4.0 abrange diversas áreas de atuação, como por exemplo agricultura, medicina, gestão pública (*Smart Cities*), entre outras, adotou-se como escopo deste estudo a realização da pesquisa em indústrias de manufatura classificadas como processos de transformação (CNAE<sup>2</sup>, Subclasses 2.3, seção C), especificamente relacionadas à indústria automotiva. A razão para a definição deste escopo deu-se pelo nível de aderência às tecnologias I4.0 evidenciados nesse seguimento industrial (HOFMANN; RÜSCH, 2017; RÜßMANN *et al.*, 2015; LUGERT *et al.*, 2018; MÜLLER *et al.*, 2018; POWELL *et al.*, 2018).
- c) **Práticas de Excelência Operacional.** Para a operacionalização da estrutura de análise da pesquisa, espera-se que as organizações participantes apresentem um bom nível de maturidade nas práticas LSS. Isso requer uma estrutura mínima incluindo a formação de especialistas (*green belts, black belts ou lean practitioners*) e a execução de projetos LSS ou eventos *kaizen* (MONTGOMERY e WOODALL, 2008; CORBETT, 2011; PYSDEK; KELLER, 2011; ISMYRLIS; MOSCHIDIS, 2013). Considerando o tempo necessário para a implementação dessas ações, adotou-se como critério o tempo mínimo de pelo menos 2 anos de experiência contínua na implementação de projetos LSS ou eventos *kaizen* nas empresas.
- d) **Estratégia de conversão para o modelo I4.0.** Observando os 13 pontos de convergência apresentados no Quadro 4, fica evidente a necessidade de selecionar casos em que seja possível evidenciar a implementação de pelo menos um ponto de convergência entre práticas LSS e tecnologias I4.0. Sendo assim, optou-se por selecionar empresas cujo nível de maturidade I4.0 pudesse ser caracterizado como “*Full-scale adopters*”, conforme apresentado no final da seção 2.2.3.
- e) **Localização em um raio de 500Km de São Carlos.** Este critério foi estabelecido com base na limitação dos recursos (tempo e orçamento) disponíveis para a realização da pesquisa.

---

<sup>2</sup> Classificação verificada em <<https://www.ibge.gov.br/>> Acesso em 25/05/2020.

### 3.2.4 Qualidade do Projeto de Pesquisa

O projeto de pesquisa envolvendo estudos de caso deve assegurar a qualidade e a confiabilidade da pesquisa por meio de quatro condições (VOSS *et al.*, 2002; YIN, 2009): (i) validade da estrutura de análise de pesquisa, que é a extensão na qual a qualidade das medidas operacionais refletem os conceitos que serão investigados; (ii) validade interna, que busca estabelecer relações de causa e efeito, geralmente observadas em estudos de natureza explanatória; (iii) validade externa, que se refere à capacidade de generalização dos resultados além do estudo de caso imediato, e (iv) confiabilidade, que diz respeito à capacidade de replicação dos procedimentos de pesquisa de modo a obter os mesmos resultados.

Diante do que foi exposto acima, foram estabelecidos alguns critérios para testar a qualidade do projeto desta tese. Em primeiro lugar, a validade da estrutura de análise da pesquisa pode ser justificada por meio do referencial teórico especializado no tema, que reuniu 33 trabalhos publicados na forma de artigos de periódicos e conferências disponíveis em duas bases de dados reconhecidas pela comunidade científica. Após a sua construção, essa estrutura foi verificada e validada por oito pesquisadores especialistas no tema desta pesquisa, que atuam em quatro instituições de ensino superior. A validação externa foi testada a partir da replicação da estrutura de análise da pesquisa nas duas empresas participantes. Um protocolo de estudo de caso foi estruturado para assegurar a confiabilidade dos dados. Entende-se que a validade interna não se aplica ao projeto desta pesquisa, visto que, conforme elucidado por Yin (2009), esse critério é direcionado apenas para estudos de natureza explanatória.

Para verificar a consistência interna das respostas fornecidas pelos entrevistados adotou-se como medida de confiabilidade a estatística alpha de Cronbach, que é utilizada para avaliar o grau de confiabilidade com a qual determinada escala, adotada para a definição das variáveis originais, produz resultados consistentes sobre a relação dessas variáveis (FÁVERO; BELFIORE, 2015). O alpha de Cronbach pode ser determinado a partir da expressão 1:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^k S_i^2}{S_t^2} \right] \quad (1)$$

Onde  $k$  é o número de itens (perguntas do questionário),  $S_i^2$  corresponde a variância de cada item, e  $S_t^2$  corresponde a variância total do questionário, determinada como a soma de todas as variâncias. Fávaro e Belfiore (2015) explicam que, embora não haja um consenso na literatura para fixar o valor limite de alpha visando a validação da consistência interna, é interessante que o resultado obtido seja superior a 0,6.

### 3.2.5 Coleta de Dados

Por ter acesso às informações operacionais, os estudos de caso fornecem aos pesquisadores, a oportunidade para coletar dados com grande acurácia e confiabilidade (VOSS *et al.*, 2002). Tais estudos permitem a coleta de uma grande variedade de dados provenientes de diversas fontes de pesquisa, incluindo profissionais que atuam como agentes da mudança organizacional, processos empresariais, documentos e dados internos e externos, entre outros. Essas fontes de pesquisa oferecem a possibilidade de extrair informações na forma de arquivos, entrevistas, questionários e observações, seja na pesquisa de natureza qualitativa, usando palavras, seja na pesquisa quantitativa, com foco em números (EISENHARDT, 1989; LEONARD-BARTON, 1990).

A utilização de múltiplas fontes de evidência por meio da triangulação entre dados provenientes de entrevistas, documentos e observação, representa uma estratégia de coleta e análise de dados recomendada para estudos de caso múltiplos, permitindo que um investigador desenvolva linhas convergentes de investigação (YIN, 2009). Deste modo, definiu-se como fontes primárias de dados a entrevista semiestruturada, por entender que a utilização de questões abertas permite que o pesquisador compreenda a perspectiva dos participantes da entrevista (ROESCH, 2006). Também foram consideradas na análise as observações registradas pelo pesquisador durante a entrevista, bem como os documentos e registros internos da empresa, tais como apresentações institucionais, projetos LSS, relatórios de eventos *kaizen* e outros documentos referentes a implementação dos pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e práticas LSS evidenciados na organização.

As questões utilizadas nas entrevistas semiestruturadas incluíram questões gerais de mapeamento de conteúdo (*mapping questions*) e questões de mineração (*mining questions*). Legard *et al.*, (2013) diferenciam esses dois tipos de questões, explicando que as questões de mapeamento são projetadas para abrir o território de pesquisa e identificar a dimensão ou os problemas relevantes para o participante. Por outro lado, as questões de mineração são projetadas para explorar os detalhes que estão dentro de cada dimensão a fim de acessar o significado que ele contém para o entrevistado e gerar uma compreensão profunda do ponto de vista do usuário interno. Enquanto as questões fechadas de mapeamento foram direcionadas para a verificação de aderência às categorias da estrutura de análise da pesquisa, segundo uma escala Likert de cinco pontos (variando de 1 “discordo totalmente” até 5 “concordo totalmente”), as questões abertas de mineração foram empregadas para a pesquisa em profundidade, buscando a riqueza de detalhes quanto aos constructos investigados.

O Apêndice B apresenta roteiro de entrevista completo. É importante salientar que as questões de mineração seguiram um procedimento não indutivo, de modo que o entrevistado aprofundasse suas observações e respostas. Para auxiliar a execução de entrevistas em pesquisas científicas, Legard *et al.*, (2013) sugerem alguns requisitos, tais como habilidade para ouvir os entrevistados, pensamento claro e lógico, boa memória, curiosidade, entendimento com o participante, senso de tranquilidade, entre outros. Para Miguel e Souza, (2012), a coleta de dados deve ser finalizada apenas quando os dados adicionais não acrescentarem nova informação relevante (saturação teórica). Assim, o número de entrevistados foi definido de acordo com a disponibilidade de respondentes na organização, assim como o nível de saturação das entrevistas.

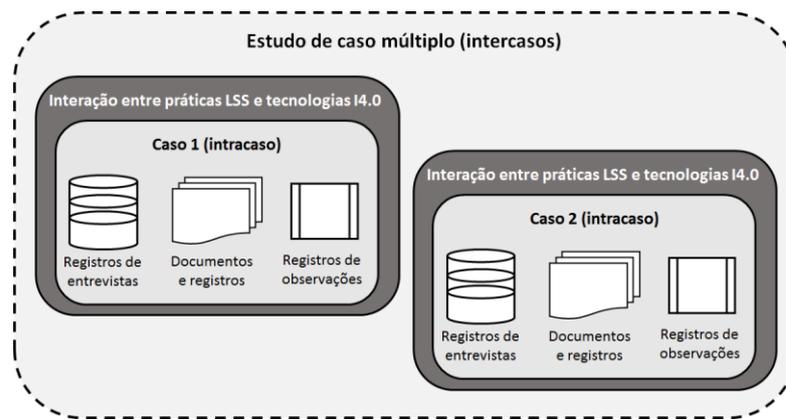
Com o propósito de assegurar que apenas pessoas competentes em termos de conhecimento e experiência nos temas centrais desta pesquisa participassem das entrevistas, adotou-se como perfil de respondentes os seguintes critérios: (i) colaboradores que tenham formação específica e experiência em projetos de excelência operacional (*green belts, black belts, master black belts, lean practitioners e champions*); e (ii) profissionais que ocupam cargos de liderança nas atividades voltadas à gestão da produção; e (iii) profissionais das áreas de tecnologia da informação, automação industrial e recursos humanos, que tenham conhecimento e experiência na implementação dos pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e práticas LSS identificadas na pesquisa.

### **3.2.6 Análise de Dados**

Em pesquisas qualitativas, o processo analítico se inicia a partir dos primeiros dados coletados (CORBIN; STRAUSS, 1990). Desta forma, o processo de análise inerente à pesquisa empírica foi iniciado a partir das visitas *in loco* às empresas participantes. Contudo, somente após a coleta de todos os dados, incluindo gravações das entrevistas, documentos fornecidos pelas empresas e registro de observações, o pesquisador iniciou a transcrição das gravações e análise de conteúdo para a elaboração dos relatórios de casos individuais.

A Figura 8 ilustra a abordagem utilizada no procedimento analítico, onde a análise dos casos individuais precedeu a análise intercasos. Assim, enquanto a análise intracaso buscou evidências empíricas a respeito das proposições da pesquisa, a análise intercasos foi executada *a posteriori*, de modo a observar as possibilidades de replicação nos casos observados.

Figura 8 - Análise de estudo de caso múltiplo



Fonte: Adaptado de Yin (2009)

Os relatórios de casos individuais apresentaram uma narrativa do processo investigativo destacando as declarações a respeito das práticas evidenciadas, as frequências das respostas de acordo com as percepções dos entrevistados, assim como as frequências das citações dos componentes da estrutura de análise da pesquisa. Com base nessas informações, elaborou-se um mapa conceitual com o propósito de destacar os principais componentes da estrutura de análise da pesquisa, as proposições segundo os objetivos do estudo e a relação entre eles.

O uso de mapas conceituais como técnica de pesquisa permite a identificação dos principais conceitos e ideias pertinentes a um assunto, assim como a descrição das relações existentes entre esses conceitos na forma de um desenho esquemático, que representa a compreensão do pesquisador sobre um corpo de conhecimento (SHERRATT; SCHLABACH, 1990). Neste sentido, mapas conceituais foram desenvolvidos para apoiar a análise intracaso. De outro modo, o relatório intercasos apresentou uma análise cruzada das práticas observadas nas duas empresas a fim de facilitar a comparação das evidências de pesquisa. Com o propósito de obter *insights* e promover a triangulação das evidências obtidas (entrevistas, documentos e observações), um painel de análise de dados foi elaborado nesta fase da pesquisa.

A análise de textos em pesquisa científica tem recorrido a técnicas que buscam classificar palavras, frases ou até parágrafos inteiros em categorias de conteúdo por meio de técnicas simples ou métodos estatísticos mais complexos, incluindo análise fatorial, regressão múltipla e análise discriminante (ROESCH, 2006). Nesse contexto, a análise de conteúdo reúne um conjunto de técnicas de análise das comunicações, onde o analista exerce um papel semelhante a um arqueólogo trabalhando com “vestígios” em documentos que podem ser suscitados pelas necessidades da pesquisa ou documentos produzidos naturalmente, abrangendo tudo o que é comunicação (BARDIN, 2016).

Corbin e Strauss (1990) sugerem que os conceitos observados a um certo fenômeno podem ser agrupados em categorias que são fundamentais para o desenvolvimento da teoria. De acordo com esses autores, tais categorias, após serem codificadas, podem ser comparadas entre si observando similaridades e diferenças. Assim, a codificação dos dados permite a redução da quantidade de informação, de modo que todos os dados analisados tenham estreita relação com os objetivos da pesquisa.

Enquanto a codificação aberta permite a formação de categorias e subcategorias a partir da observação das similaridades e diferenças entre os códigos abertos (que podem ser atribuídos a eventos, ações ou interações), a codificação axial busca a relação entre essas categorias e subcategorias a fim de verificar hipóteses contra as evidências observadas e relações de causa e efeito entre os códigos (CORBIN; STRAUSS, 1990). Desta forma, a codificação aberta foi aplicada seguindo a ordem das transcrições das entrevistas em cada empresa, por meio do agrupamento das unidades de registro em categorias pré-definidas, de acordo com a estrutura de análise da pesquisa. A codificação axial, por sua vez, permitiu a análise das conexões entre as categorias ou componentes da estrutura de análise da pesquisa evidenciadas nas duas empresas.

Com o intuito de facilitar a visualização dos códigos gerados na análise de conteúdo, bem como compreender a conexão entre eles, procedeu-se uma análise de rede social. Além disso, a aplicação de técnicas quantitativas, incluindo teste de hipótese não paramétrico e Análise dos Componentes Principais (ACP) serviu para complementar os *insights* obtidos na análise qualitativa.

## 4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da pesquisa. Primeiramente, são apresentados os resultados da RSL, a qual foi direcionada para a identificação dos PCs e construção da estrutura de análise da pesquisa conceitual. Em seguida, são apresentados os resultados decorrentes do estudo multicase. A identificação das organizações por meio do nome fantasia ou razão social foram aqui omitidas, utilizando-se em seu lugar a denominação genérica “Empresa”, seguida da ordem na qual o estudo foi desenvolvido (Empresa A e Empresa B).

### 4.1 PONTOS DE CONVERGÊNCIA E ESTRUTURA DE ANÁLISE DA PESQUISA

Os parágrafos a seguir abordam o estado da arte a respeito dos PCs com base nos resultados da RSL. Esses estudos forneceram exemplos preliminares de interação entre práticas LSS e tecnologias da I4.0. O Quadro 3 apresenta em ordem cronológica uma síntese dos PCs identificados nos 33 trabalhos recuperados e analisados por meio da RSL.

A identificação de oportunidades para melhoria no chão de fábrica pode ser auxiliada por sistemas de informação, sensores conectados às máquinas, comunicação M2M e IIoT. No estudo demonstrado por Ante *et al.*, (2018), a comunicação entre máquinas inteligentes conectadas por Controlador Lógico Programável (PLC), permitiu a medição do fluxo de valor por meio de indicadores relacionados à qualidade, custo e entrega, gerados automaticamente no sistema de informações da fábrica e disponibilizados por meio de um painel visual para identificação e priorização de ações de melhoria.

O *Big Data Analytics* também pode contribuir para a identificação e priorização de ações de melhoria a partir de dados armazenados automaticamente. De acordo com Hoerl *et al.* (2014), duas atividades inerentes à implementação de *Big Data* estão diretamente associadas à fase de Definição do ciclo DMAIC: (i) identificação de problemas de alto impacto na organização; e (ii) estruturação dos problemas complexos para uma boa definição do problema a ser trabalhado. Esses autores alertam que a aplicação de *Big Data* em projetos de melhoria não deve se concentrar apenas em algoritmos numéricos sofisticados, mas também na qualidade dos dados e no uso de estratégias para resolver problemas complexos e não estruturados. Por meio de algoritmos específicos, o *Big Data Analytics* também é capaz de filtrar uma grande quantidade de dados dos clientes e alimentar as matrizes da Casa da Qualidade utilizadas no Desdobramento da Função Qualidade - QFD (LI *et al.*, 2015). Assim, a integração entre *Big Data Analytics*, dispositivos inteligentes e QFD poderá auxiliar a identificação dos Fatores Críticos para a Qualidade - CTQs (SANDERS *et al.*, 2016).

Com relação ao pensamento estatístico adotado em projetos LSS, questões voltadas à amostragem dos dados poderão ser significativamente redefinidas, considerando a ideia que “*tamanho da amostra é igual a tudo*” foi usada para demonstrar que o *Big Data* abrange toda a população de interesse (HOERL *et al.*, 2014). Tal concepção poderia atenuar problemas em relação ao número ideal de amostras para estudos de inferência estatística, como testes de hipóteses, análise ANOVA e estudos de capacidade, entre outros. Outra integração promissora para a coleta de dados em processos de manufatura é o uso de gêmeos digitais para auxiliar as técnicas de mapeamento dos processos, como por exemplo, o Mapeamento de Fluxo de Valor Digital, construído a partir de informações coletadas em tempo real, ao invés de usar modelos estocásticos (MAYR *et al.*, 2018).

Outro exemplo de integração entre VSM e I4.0 é apresentado por Lugert *et al.*, (2018), que propõe uma estrutura conceitual onde a análise do fluxo de valor pode ser facilitada por meio de dispositivos RFID integrados aos sistemas ERP e MES em tempo real. O modelo de “*Mapeamento Dinâmico do Fluxo de Valor*” proposto pelos autores é capaz de analisar dados históricos e reconhecer automaticamente oportunidades de melhoria para o mapa futuro em relação às métricas de *lead time*, confiabilidade, inventário e OEE.

O uso de simulação integrado com práticas LSS também foi evidenciado na literatura. Neste cenário, a análise do processo auxiliada por simulação computacional pode proporcionar um melhor entendimento das relações de causa e efeito por meio de algoritmos e gêmeos digitais. Além disso, a simulação pode oferecer uma melhor compreensão sobre a dinâmica envolvida em sistemas logísticos complexos, recorrendo à análise dos efeitos da modificação de determinados parâmetros, como redução de tempos de entrega, falhas de equipamentos, entre outros (TAMÁS *et al.*, 2016).

Com relação às ações voltadas para a eliminação de desperdícios na produção, entende-se que a nova geração de máquinas fará uso de sistemas “*plug and play*” e *machine learning*, de modo a responder às variações na demanda e no tamanho dos lotes. Por meio de algoritmos, RFID e auto-otimização, os materiais a serem processados se comunicarão diretamente com as máquinas, resultando em menor tempo de *setup* (SANDERS *et al.*, 2016). Além disso, CPS poderão ser utilizados para projetar e implementar um sistema *Jidoka* capaz de integrar sensores, atuadores, controladores e *software*, com o objetivo de converter e analisar dados, detectar anormalidades e fornecer *feedback* em tempo real (MA *et al.*, 2017).

A Robótica Avançada é outra tecnologia alinhada com o propósito de melhorar a produtividade dos processos industriais. Em um estudo de casos múltiplos envolvendo empresas suecas e japonesas, Hedelind e Jackson (2011) mostraram que a robótica industrial pode ser usada de forma mais eficaz em sistemas de manufatura enxuta, adicionando um "toque humano" através do envolvimento de operadores na implementação de estações automatizadas.

No contexto dos programas *Total Productive Maintenance* (TPM), Li *et al.* (2015) acreditam que as tecnologias I4.0 mudarão a natureza das atividades tradicionais de manutenção, dando origem ao conceito de *e-maintenance*, onde tecnologias RFID, *Big Data* e IIoT poderão monitorar componentes ao longo de todo o ciclo de vida. Mayr *et al.*, (2018) relatam um caso envolvendo a integração entre TPM e I4.0 por meio da implementação do sistema "*Condition Monitoring System*", o qual reduz a probabilidade de falhas da máquina. Em outro estudo relacionado ao tema, Sanders *et al.* (2017) mostram que os padrões de falha de máquinas e equipamentos podem ser reconhecidos por algoritmos inteligentes que indicarão quando um componente estará sujeito a falhas e, caso a interrupção seja inevitável, outros recursos poderão ser comunicados via M2M para realizar as correções necessárias.

Embora a Manufatura Aditiva tenha sido a tecnologia I4.0 com o menor número de citações encontradas na pesquisa, sua aplicação no âmbito da excelência operacional pode ser promissora. Sob esse aspecto, Chen e Lin (2017) relatam os benefícios da interação entre a Impressão 3D e *Lean Manufacturing* em cinco categorias: (i) impressão sob demanda, que está associada aos conceitos de estoques reduzidos, pequenos lotes e sistemas *pull*; (ii) automação, relacionada ao princípio da separação homem-máquina e a técnica 5S; (iii) facilidade de manutenção, também relacionada ao 5S; (iv) linhas dedicadas, assumindo que as instalações com impressoras 3D poderiam ser isoladas de outras instalações, permitindo, assim, reduzir o tamanho de uma fábrica; e (v) facilidade de implementação, que por sua vez está relacionada aos conceitos de *downsizing*, logística eficiente, prazos curtos e *just-in-time*.

O conceito de Qualidade Inteligente (*Smart Quality*) ilustrado em um estudo de caso italiano conduzido por Powell *et al.*, (2018), revela que a implementação de Máquinas de Medição por Coordenadas (CMM) foi capaz de aumentar a eficiência das atividades de inspeção e CEP. Tal sistema resultou na comunicação *paperless* e em tempo real nos *smartphones* dos supervisores. Em outro projeto intitulado "*Intelligent Fault Correction e Self-Optimising Manufacturing Systems - IFaCOM*", Eleftheriadis e Myklebust (2016) relatam a integração entre CPS e práticas LSS, a partir do sensoriamento para monitorar os parâmetros vitais do processo de fabricação em tempo real. Ambos os exemplos, ilustram possibilidades de integração entre tecnologias digitais e atividades de controle da qualidade.

A técnica de gestão visual *Andon*, geralmente utilizada para a implementação do pilar *Jidoka*, visa o compartilhamento do status do processo para dar senso de urgência aos operadores. No contexto dos CPS, sensores específicos serão capazes de reconhecer e corrigir falhas automaticamente, além de notificar em tempo real os operadores equipados com *smartwatches* (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015). Além disso, dados provenientes da produção e armazenados em nuvem poderão ser usados para identificar e evitar defeitos, servindo como uma solução complementar aos tradicionais dispositivos *poka-yoke* (MA *et al.*, 2017; MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017).

No domínio das atividades realizadas no chão de fábrica, a tecnologia de realidade aumentada poderá auxiliar diversas atividades industriais, incluindo inspeção, manutenção, montagem e treinamento, além de facilitar o gerenciamento dos processos de modo a reduzir a probabilidade de erros humanos. No contexto das práticas LSS é possível associar essa tecnologia com as atividades de padronização e treinamento. Sob essa perspectiva, o emprego de realidade aumentada por meio de *tablets* e *head-mounted displays* é capaz de aumentar a eficácia de atividades manuais e facilitar a aprendizagem no trabalho (SCHMITT *et al.*, 2013). Além disso, a realidade aumentada também pode ser empregada para a análise de movimentos e otimização dos tempos de ciclo de uma operação (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015).

Diversos projetos LSS buscam a conversão de sistemas empurrados para sistemas puxados por meio da implementação de *kanbans*. Contudo, essa técnica envolve a manipulação de cartões físicos, podendo resultar em perda ou esquecimento desses cartões (THOBEN *et al.*, 2014). No contexto da I4.0, essa técnica pode ser automatizada por meio de máquinas inteligentes, sensores, atuadores e dispositivos RFID (*e-kanban*), capazes de detectar informações em tempo real e com alta confiabilidade (MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017; WAGNER *et al.*, 2017). Entretanto, a implementação desta solução requer uma reengenharia de insumos, incluindo etiquetas e caixas inteligentes, interação entre sistemas de manufatura (ERP e MES), bem como a configuração das informações de saídas (*Dashboards* e automação), podendo contar com o uso de AGV's e drones (ROMERO *et al.*, 2018).

Quadro 3 - Pontos de convergência entre tecnologias I4.0 e práticas LSS

Autor(es)/Ano	Principais Tecnologias	Práticas LSS	Método de Pesquisa	Pontos de Convergência identificados	Área de Pesquisa	País
Hedelind; Jackson (2011)	Robótica Avançada e CPS	OEE e <i>Jidoka</i>	Estudo de Caso	(1) Robôs industriais podem ser usados para controlar a produção, inspecionar a qualidade dos produtos e reduzir tempos de ciclo. (2) Dispositivos <i>poka-yoke</i> podem ser utilizados de forma digital, por meio de PLCs.	Tecnologia em Manufatura	Suécia
Krammer <i>et al.</i> , (2011)	RFID e Simulação	Teoria das Restrições e VSM	Estudo Teórico	A análise do fluxo de valor e dos recursos gargalos pode ser suportada por tecnologias de fabricação avançadas, incluindo RFID e Simulação.	Tecnologia em Manufatura	Luxemburgo
Southard <i>et al.</i> , (2012)	RFID e Simulação	VSM e Modelo DMAIC	Estudo de Caso	(1) Uso de simulação usando evento discreto e tecnologia RFID para mapear o fluxo de valor em processos de negócios. (2) Desenvolvimento de <i>poka-yokes</i> usando a tecnologia RFID para reduzir a probabilidade de erros nos procedimentos médicos.	Garantia da Qualidade	EUA
Nicoletti (2013)	IoT, M2M e <i>Big Data Analytics</i>	Controle de Processo, Modelo DMAIC e OEE	Estudo de Caso	A integração entre IIoT, RFID, CPS, <i>Big Data</i> e <i>Business Process Intelligence</i> permite o controle e identificação do <i>status</i> do processo em tempo real, aumentando o valor do OEE para cada máquina conectada no sistema e reduzindo desperdícios na fábrica.	Sistema de Produção	Itália
Schmitt <i>et al.</i> , (2013)	CPS e Realidade Aumentada	Controle de Processo e Padronização	Experimento	Um sistema que integra uma rede de sensores e câmeras conectados ao corpo dos operadores e tecnologia <i>Eye Tracking</i> é capaz de instruir um operador na execução correta de uma tarefa.	Tecnologia da Informação	Alemanha
Bal; Satoglu (2014)	CPS e Simulação	Manutenção Preditiva e OEE	Simulação	O monitoramento de máquinas por meio de sensores e RFID pode otimizar os resultados relativos à confiabilidade dos equipamentos e oferecer condições para a simulação de falhas usando simulação de eventos discretos.	Administração e Tecnologia	Turquia
Hoerl <i>et al.</i> , (2014)	<i>Big Data Analytics</i>	Pesamento Estatístico e Modelo DMAIC	Estudo Teórico	<i>Big Data Analytics</i> e Pensamento Estatístico podem ser utilizados em conjunto para solucionar problemas não estruturados. Além disso, a aplicação de enfoques disciplinados no tratamento de dados, como por exemplo na fase Definição do modelo DMAIC, podem resultar em melhores soluções para problemas que envolvem <i>Big Data</i> .	Estatística e Computação	USA
Lee <i>et al.</i> , (2014)	<i>Big Data Analytics</i> e CPS	Manutenção Preditiva e OEE	Estudo de Caso	A “auto-manutenção” de máquinas pode ser alcançada por meio da integração entre CPS, <i>Big Data</i> e Inteligência Artificial ( <i>Smart Analytics</i> ), com consequente aumento de produtividade.	Manutenção Industrial	USA
Kolberg; Zühlke (2015)	CPS	Sistema <i>kanban</i> e <i>Jidoka</i>	Estudo Teórico	(1) Os tradicionais cartões físicos <i>kanban</i> podem ser substituídos por controle digitais ( <i>e-kanban system</i> ), onde a identificação dos níveis de estoques é feita por meio de sensores capazes de enviar ordens de ressuprimento aos fornecedores de forma autônoma. (2) As tecnologias de Realidade Aumentada podem auxiliar os operadores na identificação de problemas e promoção do fluxo contínuo em tempo real. (3) Células em formato de “U” que requerem interação homem-máquina podem ser otimizadas empregando robótica e sistemas de manufatura.	Inteligência Artificial e Produção Industrial	Alemanha

Autor(es)/Ano	Principais Tecnologias	Práticas LSS	Método de Pesquisa	Pontos de Convergência identificados	Área de Pesquisa	País
				(4) Estações de trabalho modulares podem ser reconfiguradas de maneira flexível por meio de soluções <i>Plug'n'Produce</i> que integram espaços físicos padrão com tecnologia da informação, reduzindo os tempos de <i>setup</i> .		
Li <i>et al.</i> , (2015)	<i>Big Data Analytics</i>	QFD e Controle de Processos	Estudo Teórico	(1) Técnicas específicas de <i>Big Data Analytics</i> e algoritmos podem ser utilizados para capturar uma grande quantidade de dados e auxiliar o Desdobramento da Função Qualidade (QFD). (2) A utilização conjunta de dispositivos RFID e <i>Big Data Analytics</i> pode ser aplicada para controlar a qualidade do produto em tempo real e otimizar as atividades de manutenção preventiva/preditiva.	Automação	China
Yang <i>et al.</i> , (2015)	Simulação	VSM e Produção Puxada	Estudo de Caso	A integração entre VSM e simulação (eventos discretos) permite a redução do tempo de ciclo e níveis de inventário usando um sistema puxado em um processo laboratorial.	Sistema de Manufatura	Taiwan
Eleftheriadis; Myklebust (2016)	IIoT e CPS	Controle Estatístico de Processo	Estudo multicaseos	Correção inteligente de falhas e monitoramento dos processos de produção em tempo real, por meio de soluções integradas de tecnologia da informação, comunicação e CPS.	Engenharia Industrial	Noruega
Sanders <i>et al.</i> , (2016)	IoT, <i>Big Data</i> , RFID e Machine Learning	QFD, Just in time, SMED, TPM	Estudo Teórico	(1) Soluções IIoT podem otimizar a movimentação e o armazenamento de materiais facilitando o controle e a rastreabilidade da produção. (2) Dados provenientes de <i>Smart Products</i> e <i>Big Data</i> poderão ser utilizados em estudos de QFD. (3) A aplicação de sensores ( <i>e-kanban</i> ) e dispositivos RFID permitem o controle dos níveis de estoques em tempo real. (4) <i>Setup time</i> pode ser reduzido por meio de “ <i>plug an play</i> ” systems and <i>Machine Learning</i> . (5) A comunicação H2M e a manutenção preditiva por meio de aplicações RFID e <i>Big Data</i> podem auxiliar a implementação da TPM.	Engenharia de Manufatura	Alemanha
Tamás <i>et al.</i> , (2016)	CPS, Simulação, IIoT e <i>Big Data Analytics</i>	VSM	Simulação	Melhoria da aplicação do método VSM por meio simulação do estado futuro a partir da parametrização das variáveis inerentes ao processo produtivo e sistemas logísticos de alta complexidade (incluindo diversas linhas de produto ao mesmo tempo).	Engenharia de Produção	Hungria
Chen; Lin (2017)	Manufatura Aditiva	<i>Pull System</i> , Jidoka, 5S e <i>Just-in-Time</i>	Estudo Teórico	Manufatura Aditiva pode ser associada com as práticas <i>Lean Manufacturing</i> nas seguintes categorias: impressão sob demanda; automação; manutenção; e fácil implementação.	Sistemas Inteligentes	Taiwan
Freitas <i>et al.</i> , (2017)	RFID e Integração de sistemas	Logística interna e fluxo contínuo	Estudo de Caso	Os autores propõem um <i>software</i> denominado “ <i>Smart Internal Supply Chain</i> ” que integra tecnologias de informação e RFID para logística interna em um contexto <i>lean</i> . É evidenciado o benefício do uso de RFID na cadeia de suprimentos interna, aumentando a eficiência e a produtividade dos processos em até 50% e, conseqüentemente, economizando custos logísticos.	Engenharia de Produção	Portugal
Guimire <i>et al.</i> , (2017)	IoT	Gestão de Projetos	Estudo Teórico	O uso de sensores e RFID integrados à um sistema computacional para o monitoramento de processos no chão de fábrica permite a tomada de decisão em tempo real e com acuracidade de informações.	Manufatura Integrada por Computador	Portugal

Autor(es)/Ano	Principais Tecnologias	Práticas LSS	Método de Pesquisa	Pontos de Convergência identificados	Área de Pesquisa	País
Kolberg <i>et al.</i> , (2017)	CPS e MES	<i>Pull System</i> e <i>Heijunka</i>	Estudo Teórico	<i>Lean Automation</i> é a aplicação das tecnologias I4.0 aos métodos <i>Lean Manufacturing</i> . Os autores sugerem o <i>Heijunka-Board</i> digitalizado com interfaces gráficas conectados à linha de produção e ao sistema MES.	Sistemas de Produção	Alemanha
Laux <i>et al.</i> , (2017)	<i>Big Data Analytics</i>	Modelo DMAIC	Estudo Teórico	Os princípios inerentes ao <i>Big Data</i> podem ser incorporados em projetos Seis Sigma, em todas as fases (DMAIC) do projeto, com orientação para as necessidades dos clientes e tomada de decisão baseada em dados.	Gestão de Desempenho	USA
Ma <i>et al.</i> , (2017)	CPS e IIoT	<i>Jidoka</i>	Estudo de Caso	Um CPS pode ser utilizado na implementação de um sistema <i>Jidoka</i> inteligente por meio de uma arquitetura orientada a serviços, nuvem e IIoT, com a finalidade de converter e analisar o processo automaticamente, detectar anormalidades e fornecer <i>feedback</i> à operação.	Ciência e Tecnologia	China
Mrugalska; Wyrwicka (2017)	<i>Smart Factory</i> e Realidade Aumentada	<i>Kanban</i> e <i>Jidoka</i>	Estudo Teórico	(1) Sensores e dispositivos RFID podem ser utilizados como <i>Kanban</i> para controlar os estoques em tempo real. (2) Dados provenientes do sistema produtivo e armazenados em nuvem podem ser utilizados por sistemas inteligentes objetivando a prevenção de falhas, como uma alternativa aos tradicionais dispositivos <i>poka-yoke</i> . (3) Sinais luminosos empregados no sistema <i>Andon</i> poder ser replicados em equipamentos de Realidade Aumentada.	Gestão da Manufatura	Polônia
Neradilova; Fedorko (2017)	Simulação, AGV e RFID	<i>Pull System</i> e <i>Mizusumashi</i>	Simulação	Por meio da integração entre AGVs, Sistemas de Informação, RFID e simulação é possível otimizar os sistemas de transporte para movimentar materiais com eficiência, autonomia e acurácia.	Gestão da Cadeia de Suprimentos	República Checa
Rane <i>et al.</i> , (2017)	Simulação	Balanceamento de Linha, <i>kaizen</i> e <i>Jidoka</i>	Simulação	O uso de simulação em linhas de montagem permite a melhoria do desempenho do processo em termos de <i>cycle time</i> , rendimento, níveis de inventário, eficiência e redução de custos. Os resultados decorrentes de técnicas como TPM, <i>Kaizen</i> , análise de gargalos, balanceamento de linha e <i>Jidoka</i> podem ser verificadas em ambientes de simulação de processos.	Gestão de Desempenho	Índia
Sanders <i>et al.</i> , (2017)	CPS, M2M, <i>Big Data</i> , Computação em Nuvem e Realidade Aumentada	TPM, QFD e <i>Seven Wastes</i>	Estudo Teórico	(1) O uso de tecnologias como <i>Cloud Computing</i> , <i>Wireless tracking</i> e <i>collaborative manufacturing</i> permitirão o acompanhamento do fluxo de informação e materiais na cadeia produtiva (integração horizontal). (2) As atividades TPM serão otimizadas por meio da realidade aumentada e impressão de peças de reposição através da manufatura aditiva. (3) <i>Big Data Analytics</i> facilitará a implementação de QFD.	Sistemas de Produção	Alemanha
Wagner <i>et al.</i> , (2017)	CPS, M2M, <i>Big Data Analytics</i> e RFID	<i>Just-in-Time</i>	Estudo de Caso	(1) O CPS pode substituir o tradicional sistema <i>Kanban</i> por meio da integração vertical (M2M) que é capaz de conectar ordens de produção, ordens de compra automáticas e movimentação de materiais. (2) Os CPS podem viabilizar a manutenção preditiva.	Sistemas de Produção	Alemanha
Ante <i>et al.</i> , (2018)	<i>Smart Machine</i> e RFID	Medição de Desempenho e Sistema puxado	Estudo de Caso	(1) A comunicação M2M permite a medição do processo por meio de KPIs para a identificação e priorização de projetos de melhoria. (2) O sistema web de planejamento e controle da produção gera automaticamente ordens ( <i>e-kanbans</i> ) e disponibilizada a informação em um <i>Heijunka board</i> eletrônico.	Automação	Itália

Autor(es)/Ano	Principais Tecnologias	Práticas LSS	Método de Pesquisa	Pontos de Convergência identificados	Área de Pesquisa	País
Lugert <i>et al.</i> , (2018)	ERP/MES, <i>Big Data Analytics</i> e RFID	VSM	Estudo de Caso	A análise do VSM pode ser feita em tempo real, por meio de <i>Big Data Analytics</i> e simulação, a partir de uma infraestrutura técnica que integra sistemas de planejamento e controle da produção (ERP e MES) e RFID.	Sistemas de Produção	Alemanha
Mayr <i>et al.</i> , (2018)	Computação em Nuvem e CMS	VSM e TPM	Estudo de Caso	(1) Sistemas de Monitoramento de Condições ( <i>Condition Monitoring System</i> ) e computação em nuvem contribuem para melhorar o TPM. (2) Simulação e gêmeos digitais contribuem para superar o caráter estático do VSM.	Sistemas de Produção	Alemanha
Powell <i>et al.</i> , (2018)	Robótica Avançada, IIoT e Realidade Aumentada	<i>Mistake Proofing</i> e Controle da Qualidade	Estudo de Caso	(1) A implementação de robôs autônomos, IIoT e <i>Coordinate Measuring Machines</i> (CMMs) nas atividades de Controle Estatístico permite a detecção de defeitos em tempo real. (2) Uso de sistemas <i>e-learning</i> e animações 3D para a execução de instruções de trabalho e desenvolvimento de habilidades.	Sistemas de Produção	Noruega
Romero <i>et al.</i> , (2018)	IIoT, Smart Factory e <i>Big Data</i>	<i>Seven Wastes</i>	Estudo Teórico	(1) IIoT e CPS otimizam a identificação e a eliminação dos desperdícios ( <i>seven wastes</i> ) no chão de fábrica. (2) O Controle de Processo Avançado permite a correção de erros em tempo real nas operações de modo a minimizar o retrabalho e o refugo (zero defeito).	Sistemas de Produção	México
Satoglu <i>et al.</i> , (2018)	Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada, <i>Big Data Analytics</i> e Robótica	<i>Seven Wastes</i>	Estudo Teórico	(1) Manufatura Aditiva contribui com a redução de desperdícios na manufatura. (2) Realidade Aumentada auxilia a visualização de instruções de trabalho. (3) Células de manufatura podem ser projetadas a partir da integração entre <i>Big Data Analytics</i> e Robótica. (4) Realidade Aumentada e sensores podem ser empregados como <i>poka-yokes</i> fornecendo instruções operacionais e prevenindo erros. (5) Os níveis de estoques são controlados em tempo real por meio de <i>e-kanbans</i> .	Manufatura Avançada	Turquia
Sai <i>et al.</i> , (2019)	IIoT, <i>machine learning</i> e <i>deep learning</i>	TPM e prevenção de falhas em equipamentos	Estudo de Caso	Manutenção preditiva para suporte à decisão com base em técnicas de <i>machine learning</i> e <i>deep learning</i> . A estrutura proposta foi implementada como um pacote para a linguagem R e destaca o suporte proativo à decisão para a estimativa da vida útil do equipamento.	Ciências da computação	Rússia
Wielki; Koziol (2019)	IIoT e micro-localização	Mapeamento de processos e fluxo contínuo	Simulação	O uso de ferramentas de microlocalização (In Sites 4.0) que usa dispositivos como <i>tags</i> e <i>hubs</i> pode ser aplicado à otimização de processos de negócios. A modelagem flexível do espaço de trabalho gera economia devido à racionalização da utilização do espaço e à eliminação de desperdícios.	Administração	Polônia

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise do Quadro 3 revela que a maioria dos estudos relacionados aos temas deste trabalho foram desenvolvidos principalmente na Europa e nos Estados Unidos, seguindo predominantemente a abordagem qualitativa por meio de estudos teóricos e estudos de caso. Isso pode ser justificado ao considerar que grande parte das empresas ainda não possuem seus processos em estágios avançados de conversão para o modelo I4.0, dificultando os estudos de levantamento e a condução de experimentos empregando várias tecnologias ao mesmo tempo. A partir dos 33 estudos revisados, pode-se destacar três vertentes presentes na literatura:

- a) A maior parte dos estudos está direcionada para a construção ou proposição de modelos de referência para a implementação de soluções digitais no contexto da I4.0.
- b) Integração entre diversas áreas de conhecimento, com destaque para as áreas dedicadas à pesquisa em sistemas de produção, engenharia de manufatura e produção, tecnologia da informação, gestão de desempenho e automação industrial.
- c) Possibilidades de interação entre tecnologias I4.0 com as práticas LSS, principalmente com relação às nove tecnologias habilitadoras, apresentadas na seção 2.2.2.

É importante ressaltar que tais práticas cobrem todas as fases do modelo DMAIC, sendo possível a integração entre os conceitos: (i) nas atividades de definição de oportunidades para futuros projetos (HOERL *et al.*, 2014); (ii) nas atividades de mapeamento e medição de processos (SOUTHARD *et al.* 2012; LI *et al.* 2015; SANDERS *et al.* 2016; TAMÁS *et al.*, 2016); (iii) na condução de análise de relações causa-e-efeito (LAUX *et al.*, 2017); (iv) na implementação de melhorias ao longo da cadeia de valor (LI *et al.* 2015; SANDERS *et al.*, 2016); e (v) nas atividades de controle dos processos (NICOLETTI, 2013; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; LI *et al.*, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; GUIMIRE *et al.*, 2017; MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017; WAGNER *et al.*, 2017).

Ao observar atentamente o Quadro 3 percebe-se que os pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e as práticas LSS mais citados estão relacionados com o controle das operações por meio da integração entre CPS, MES e RFID. Além disso, as fases do DMAIC mais expressivas para esse tipo de integração são “Análise”, “Melhoria” e “Controle”. Contudo, destaca-se aqui a ausência de exemplos de integração que abordam importantes atividades inerentes ao ciclo DMAIC, tais como Análise do Sistema de Medição, Testes de Hipóteses, FMEA e DOE.

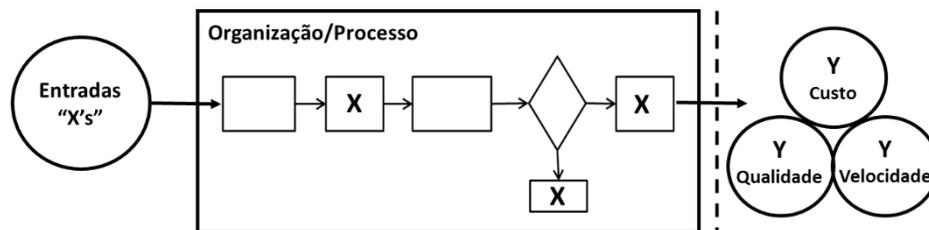
Como resultado da análise do referencial teórico constata-se quatro categorias relevantes para a construção da estrutura de análise da pesquisa. São elas: (i) O processo de manufatura, que representa o objeto de análise da pesquisa de modo a revelar “onde” a integração será evidenciada; (ii) Os Pontos de Convergência (PCs) entre tecnologias I4.0 e práticas LSS, que podem revelar “o que” será investigado durante as entrevistas; (iii) Os requisitos necessários à viabilização dessa integração, ou seja, os requisitos de tecnologia de informação, automação e competências evidenciados na literatura como necessários para compreender de forma técnica “como” as tecnologias I4.0 podem ser implementadas e integradas às práticas LSS; e (iv) os resultados decorrentes dessa integração, de modo a justificar o “por que” da estratégia de conversão para o modelo I4.0. A seguir, apresenta-se uma breve discussão a respeito dessas categorias de análise.

a) **Definição do processo**

O ponto de partida para a investigação empírica sobre a integração entre as tecnologias I4.0 e as práticas LSS é a definição do processo a ser investigado. Conforme apresentado no item 2.1.3, a aplicação do modelo DMAIC em um processo existente é uma condição essencial para a execução de projetos LSS (PANDE *et al.*, 2001; MONTGOMERY; WOODALL, 2008; SNEE, 2010; CORBETT, 2011; PYSDEK; KELLER, 2011; ISMYRLIS; MOSCHIDIS, 2013). Entende-se que durante a fase de definição de um projeto LSS, deve-se delimitar o escopo das ações de melhoria em direção a um processo específico. No âmbito desta pesquisa, a definição do processo também representa a seleção da unidade de análise, ou seja, pretende-se estabelecer um limite para “onde” serão evidenciados os PCs. A definição do processo nas iniciativas *lean* geralmente compreendem a amplitude do fluxo “porta a porta” (ROTHER; SHOOK, 2007).

A Figura 7 ilustra a perspectiva do fluxo de processos adotada na abordagem LSS. Na extrema esquerda estão as entradas do processo, identificadas como os “X’s” ou variáveis independentes. No centro da figura está o processo em si (representado por um fluxograma), compreendido como um conjunto de atividades que transformam entradas em saídas. Por fim, na extrema direita, estão os “Y’s” que representam os resultados decorrentes do processo ou as variáveis dependentes da função  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Sob essa perspectiva, o esforço de melhoria seguindo o fluxo DMAIC busca solucionar um problema sem alterar a estrutura básica do processo (PANDE *et al.*, 2001, PYSDEK; KELLER, 2011).

Figura 9 - Perspectiva de processos em projetos LSS



Fonte: Adaptado de Pande *et al.*, (2001)

De acordo com Eckes (2002), antes de iniciar um projeto de melhoria, deve-se identificar os processos essenciais de uma empresa e seus subprocessos-chave (atividades). Para justificar essa necessidade, esse autor contrapõe a empresa estruturada funcionalmente (vertical) com a empresa estruturada por processos (horizontal), explicando que a visão funcional pode gerar conflitos de metas e ser ineficiente por não compreender a interação entre as atividades-chave e fronteiras de um processo.

É importante ressaltar que nem todos os projetos LSS necessariamente concentram a análise na compreensão da função de transferência, podendo buscar um entendimento do processo por meio de outros enfoques, tais como Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) e eventos *kaizen* (GEORGE, 2002; ARNHEITER; MALEYEFF, 2005; KUMAR *et al.*, 2006; SALAH *et al.*, 2010; SNEE, 2010; PYSDEK; KELLER, 2011). Assim, a definição do processo como um componente da estrutura de análise, teve como objetivo a delimitação do escopo da pesquisa empírica. Deste modo, conforme discutido anteriormente, entende-se que a definição do processo como unidade de análise é de fundamental importância para o estudo, por ser capaz de especificar “onde” os pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e as práticas LSS poderiam ser evidenciados na organização.

#### b) Pontos de Convergência

O ponto central da análise da interação entre as tecnologias I4.0 e práticas LSS é a arguição sobre quais tecnologias I4.0 foram ou estão sendo utilizadas nas organizações no contexto da excelência operacional, assim como quais técnicas LSS estão sendo abordadas nesse tipo de interação. De outro modo, a investigação sobre esses PCs buscou reforçar a compreensão sobre “*Quais tecnologias I4.0 podem ser integradas com as práticas LSS*”. A RSL forneceu diversos exemplos a respeito dessa integração. O Quadro 4 apresenta uma síntese dos pontos de convergência observados no Quadro 3 agrupando-os em 13 PCs.

Quadro 4 - Síntese dos pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e práticas LSS

Pontos de Convergência (PCs)	Autor(es)
PC1. Mapeamento de processos e do Fluxo de Valor auxiliado por CPS, RFID, GPS, <i>Big Data Analytics</i> e Simulação.	Krammer <i>et al.</i> , (2011); Southard <i>et al.</i> , (2012); Yang <i>et al.</i> , (2015); Tamás <i>et al.</i> , (2016); Rane <i>et al.</i> , (2017); Lugert <i>et al.</i> , (2018); Mayr <i>et al.</i> , (2018); Wielki e Koziol (2019)
PC2. Medição e análise do desempenho do processo (KPIs) de forma automatizada por meio de CPS, <i>Big Data Analytics</i> e M2M.	Hoerl <i>et al.</i> , (2014); Ante <i>et al.</i> , (2018)
PC3. Implementação do Desdobramento da Função Qualidade (QFD) auxiliada por <i>Smart Products</i> e/ou <i>Big Data Analytics</i> .	Li <i>et al.</i> , (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016); Laux <i>et al.</i> , (2017); Sanders <i>et al.</i> , (2017)
PC4. Estudos de capacidade e CEP em tempo real usando robótica avançada ou CPS.	Powell <i>et al.</i> , (2018)
PC5. Monitoramento das condições de máquinas e equipamentos usando sensores, RFID, CPS, <i>Big Data Analytics</i> e simulação.	Bal e Satoglu (2014); Lee <i>et al.</i> , (2014); Li <i>et al.</i> , (2015); Eleftheriadis e Myklebust (2016); Sanders <i>et al.</i> , (2016); Wagner <i>et al.</i> , (2017); Mayr <i>et al.</i> , (2018); Sai <i>et al.</i> , (2019)
PC6. Otimização do sistema de abastecimento e movimentação de materiais por meio de Simulação, AGVs, Sistemas de Informação e RFID.	Sanders <i>et al.</i> , (2016); Neradilova e Fedorko (2017); Freitas <i>et al.</i> , 2017.
PC7. Inclusão de robótica e CPS em projetos de células de manufatura e fluxo contínuo.	Kolberg e Zühlke (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016); Satoglu <i>et al.</i> , 2018
PC8. Uso de soluções modulares do tipo “ <i>Plug’n’Play</i> ” e <i>Machine Learning</i> para reduzir tempo de <i>setup</i> .	Kolberg e Zühlke (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016)
PC9. Substituição dos <i>kanbans</i> físicos por controles digitais ( <i>e-kanban system</i> ) usando CPS, sensores, atuadores, e RFID para promover a produção puxada.	Kolberg e Zühlke (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2016); Mrugalska e Wyrwicka (2017); Wagner <i>et al.</i> , (2017); Ante <i>et al.</i> , (2018); Satoglu <i>et al.</i> , 2018
PC10. Controle da produção e visualização do status das operações de manufatura em tempo real por meio de CPS, IIoT, MES e RFID.	Nicoletti (2013); Li <i>et al.</i> , (2015); Kolberg <i>et al.</i> , 2017; Rane <i>et al.</i> , (2017); Ma <i>et al.</i> , (2017); Romero <i>et al.</i> (2018)
PC11. Emprego de robótica autônoma ou colaborativa nas atividades de controle da qualidade ( <i>Smart Quality</i> ).	Hedelind e Jackson (2011)
CP12. Uso de sensores, atuadores, RFID, Inteligência Artificial e Realidade Aumentada como soluções para <i>mistake proofing</i> ( <i>digital poka-yoke</i> ).	Hedelind e Jackson (2011); Southard <i>et al.</i> , (2012); Ma <i>et al.</i> , (2017); Mrugalska e Wyrwicka (2017); Satoglu <i>et al.</i> , 2018
PC13. Emprego de Realidade Aumentada e <i>e-learning</i> para instruir operadores na execução de uma determinada tarefa.	Schmitt <i>et al.</i> , (2013); Kolberg e Zühlke (2015); Sanders <i>et al.</i> , (2017); Powell <i>et al.</i> , (2018); Satoglu <i>et al.</i> , 2018

Fonte: Elaborado pelo autor

### c) Requisitos

Após a identificação dos PCs evidenciados no referencial teórico tornou-se necessário compreender quais requisitos seriam essenciais para a implementação das tecnologias I4.0. A investigação a respeito desses requisitos buscou encontrar respostas sobre “*Como a interação entre os PCs pode ser implementada*”. Neste sentido, as características e especificidades da I4.0 discutidas na seção 2.2.3 forneceram subsídios para o levantamento desses requisitos, incluindo: (i) requisitos de tecnologias da informação (LUCKE *et al.*, 2008; LAUDON; LAUDON, 2010; ZUEHLKE, 2010; KAGERMANN *et al.*, 2013; SCHMITT *et al.*, 2013; WALLACE; RIDDICK, 2013; GILCHRIST, 2016; PÉREZ *et al.*, 2016; GONÇALVES *et al.*,

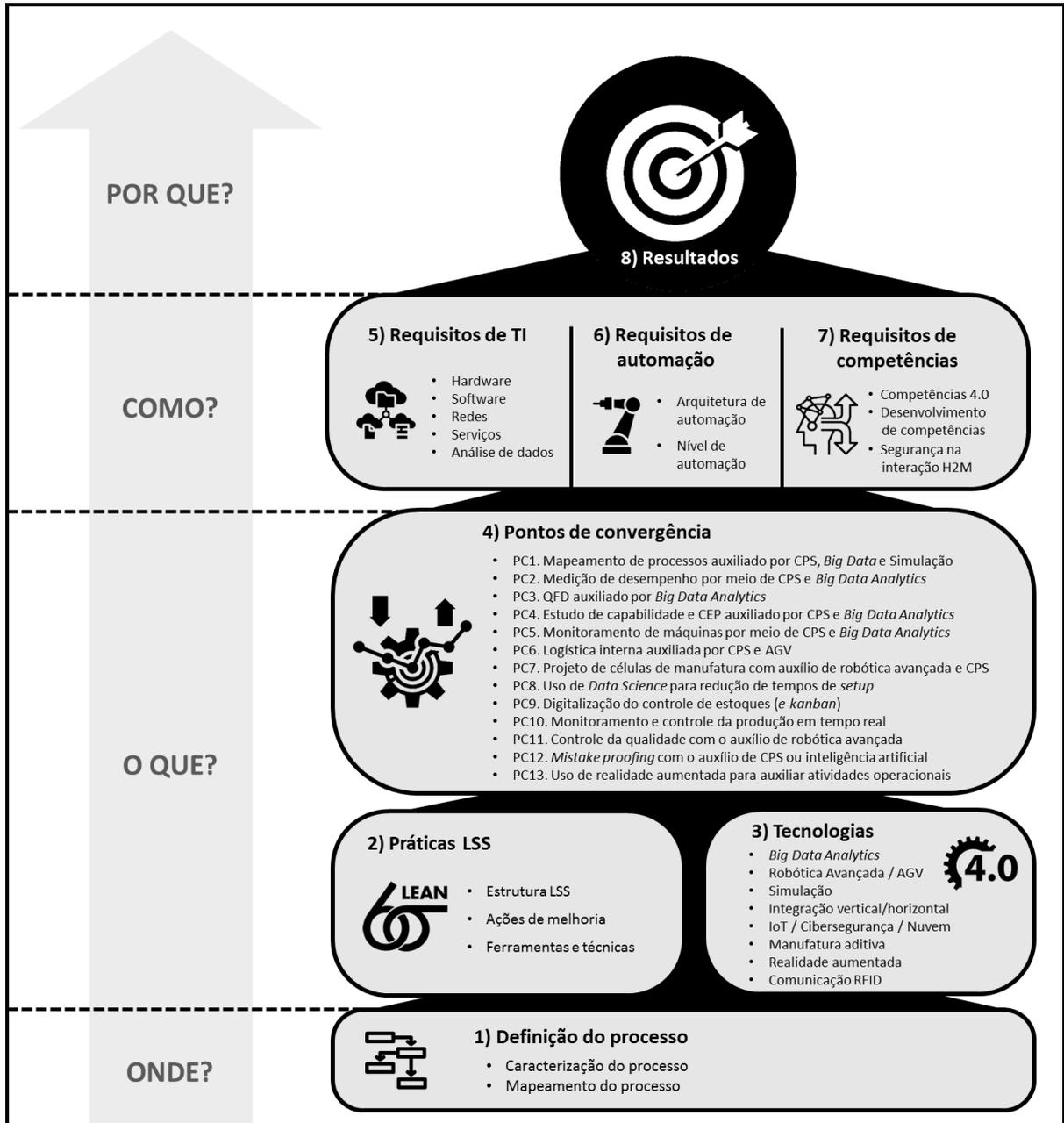
2017; WAGNER *et al.* 2017); (ii) requisitos de arquitetura de automação (LUCKE *et al.*, 2008; ZUEHLKE, 2010; KAGERMANN *et al.*, 2013; SCHMITT *et al.*, 2013; BRETTEL *et al.*, 2014; GUO *et al.*, 2014; PESSÔA; SPÍNOLA, 2014; ADOLPHS *et al.*, 2015; LEE, 2015; RÜßMANN *et al.*, 2015; BARTODZIEJ, 2016; QIN *et al.*, 2016; PFEIFFER *et al.*, 2016; TANG *et al.*, 2016; COLOMBO *et al.*, 2017; KOLBERG *et al.*, 2017; MA *et al.*, 2017; MARQUES *et al.*, 2017); e (iii) requisitos de competências (RÜßMANN *et al.*, 2015; SUSSKIND; SUSSKIND, 2015; BAYGIN *et al.*, 2016; ELEFTHERIADIS; MYKLEBUST, 2016; EROL *et al.*, 2016; LEYH *et al.*, 2016; ROMERO *et al.*, 2016; SCHUMACHER *et al.*, 2016).

#### **d) Resultados**

Além dos tradicionais resultados decorrentes de projetos LSS apresentados no Quadro 2, outros resultados proporcionados pela implementação de tecnologias I4.0 puderam ser observados na literatura incluindo: (i) coleta e análise de dados em tempo real (KAGERMANN *et al.*, 2013; ADOLPHS *et al.*, 2015; RÜßMANN *et al.*, 2015); (ii) flexibilidade da produção (RÜßMANN *et al.*, 2015; ELEFTHERIADIS; MYKLEBUST (2016); (iii) rastreabilidade do processo (NICOLETTI, 2013; SANDERS *et al.*, 2016); (iv) predição de falhas (LEE *et al.*, 2014; RÜßMANN *et al.*, 2015); (v) controle das operações em toda a cadeia de valor (ADOLPHS *et al.*, 2015), entre outros. Desta forma, a análise empírica dos benefícios evidenciados nas organizações estudadas ampliou o entendimento sobre quais seriam os resultados decorrentes da integração entre os PCs.

A estrutura de análise da pesquisa apresentada na Figura 10 detalha as categorias de análise observadas na literatura a respeito da implementação dos PCs, sob uma perspectiva “*bottom-up*”. São elas: o processo a ser investigado na organização (onde); os PCs evidenciados nesse processo (o que); os requisitos técnicos necessários para a implementação desses PCs (como), classificados aqui como “requisitos de TI”, “requisitos de automação” e “requisitos de competências”; e, por fim, os resultados observados a partir da implementação desses PCs (por que).

Figura 10 - Estrutura de análise da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.2 EMPRESA A

A Empresa A foi fundada na Alemanha em 1924 e hoje ocupa a primeira posição no *ranking* de produção de caminhões e ônibus da América Latina, atuando no Brasil desde 1956. Seus principais produtos são veículos comerciais nas linhas caminhão, ônibus, *sprinter* e agregados. Atualmente, a organização possui três plantas instaladas no Brasil, sendo duas no Estado de São Paulo e uma em Minas Gerais, que empregam juntas mais de 14 mil colaboradores.

O estudo de caso foi desenvolvido na unidade industrial localizada no Estado de São Paulo, que concentra a fabricação de mais de trinta modelos de caminhões e uma variedade de miniônibus, micro-ônibus e ônibus urbanos ou rodoviários. Essa unidade representa a maior operação da organização fora da Alemanha, com capacidade para a fabricação de 60 chassis por turno. A alta variedade dos produtos é uma característica inerente à Empresa A, que conta com fábricas independentes instaladas em uma única planta industrial, sendo uma dedicada para a produção do motor, outra para os eixos e outra especializada na montagem do chassi. Ao todo, o complexo industrial abrange uma área de 1.000.000 m<sup>2</sup> e engloba os processos de fabricação de caminhões, chassis de ônibus, motores, eixos e câmbios, centro de desenvolvimento tecnológico e administração.

Atualmente, a linha de montagem de caminhões representa o processo mais avançado em termos de transformação digital na organização. Esse processo foi reestruturado de modo que as máquinas pudessem se conectar por meio de uma rede com todos os dispositivos do chão de fábrica, incluindo sensores, transmissores, computadores e células de produção. Como resultado dessa iniciativa, os sistemas passaram a armazenar grandes volumes de dados em um *data lake*, permitindo a troca de informações de forma autônoma e em tempo real, assim como a tomada de decisões inerentes a produção por meio de modelos de inteligência artificial.

Dentre as tecnologias digitais empregadas no gerenciamento do chão de fábrica, destacam-se o uso de óculo de realidade aumentada, robôs colaborativos, exoesqueleto e dados gerados por equipamentos e AGVs, que são armazenados em um *Data Lake* para alimentar sistemas de inteligência artificial e *Big Data Analytics*. De acordo com documentos internos da empresa, o projeto de digitalização da fábrica de montagem de caminhões poderá gerar ganhos de 15% de eficiência e 20% em logística. Além disso, o planejamento estratégico da empresa prevê a conversão ao modelo I4.0 para as demais unidades até 2022.

#### 4.2.1 Análise dos resultados na Empresa A

A pesquisa na Empresa A foi conduzida no segundo semestre de 2019 a partir de entrevistas, visitas *in loco* e análise de documentos institucionais. O Quadro 5 apresenta o perfil dos entrevistados, assim como o código atribuído a cada respondente, de modo a facilitar sua identificação ao longo do texto. Ao todo, foram entrevistados 14 colaboradores de diversas áreas com responsabilidades e participação em projetos específicos relacionados ao “modelo de 10 pilares da I4.0” na organização. Além disso, os entrevistados demonstraram experiência e formação na área de excelência operacional (*Lean Manufacturing* ou Seis Sigma), conforme critério apresentado na seção 3.2.5. A soma do tempo de todas as gravações das entrevistas foi de 646 minutos (média de 46,14 minutos por entrevista). Os resultados deste caso são apresentados na seguinte ordem: caracterização do processo e cultura LSS, tecnologias 4.0, pontos de convergência, requisitos técnicos e resultados.

Quadro 5 - Perfil dos entrevistados na Empresa A

Entrevistados	Cargo (código)	Tempo de experiência na empresa	Área de Formação	Formação em Excelência Operacional
1	Gerente de Otimização de Processo (GO01)	22 anos	Engenharia Elétrica	Consultor <i>Lean (in company)</i>
2	Planejadora (PL01)	2 anos	Engenharia de Produção	<i>Yellow Belt LSS</i>
3	Analista de Treinamento (AT01)	17 anos	Engenharia Ambiental	Praticante <i>Lean (in company)</i>
4	Analista de Treinamento (AT02)	23 anos	Engenharia Mecânica	Praticante <i>Lean (in company)</i>
5	Gerente de Manutenção (GM01)	37 anos	Engenharia Elétrica	Praticante <i>Lean (in company)</i>
6	Diretor de Operações (DO01)	6 anos	Engenharia Mecânica/Civil	<i>Black Belt LSS</i>
7	Gerente da Qualidade (GQ01)	16 anos	Engenharia Mecânica	Praticante <i>Lean (in company)</i>
8	Analista Técnico da Produção (AP01)	23 anos	Administração	Praticante <i>Lean (in company)</i>
9	Assistente Executivo (AE01)	8 anos	Engenharia Mecatrônica	Praticante <i>Lean (in company)</i>
10	Gerente de Produção (GP01)	20 anos	Engenharia Mecânica	Praticante <i>Lean (in company)</i>
11	Assistente Executivo (AE02)	6 anos	Engenharia Mecânica	<i>Black Belt LSS</i>
12	Gerente de Operações Sênior (GS01)	33 anos	Engenharia Mecânica	Praticante <i>Lean (in company)</i>
13	Planejador Logístico (PL02)	38 anos	Engenharia de Produção/Mecânica	Praticante <i>Lean (in company)</i>
14	Gerente de Planejamento Logístico (GL01)	21 anos	Administração	<i>Green Belt LSS</i>

Fonte: Dados da Empresa A

#### 4.2.1.1 Caracterização do processo e cultura LSS na Empresa A

A estratégia de excelência operacional da Empresa A conta com um sistema integrado de gestão denominado *Truck Operating System* (TOS), que abrange diferentes métodos e ferramentas. O sistema TOS aliado à filosofia de melhoria contínua são os pilares da organização para alcançar a excelência operacional e os objetivos estratégicos. Neste contexto, a Empresa A dissemina nove princípios *Lean* que são utilizados para nortear a tomada de decisão no dia a dia da fábrica. São eles: (i) Tenha uma visão de longo prazo; (ii) Vá e veja; (iii) Imagine-se como seu cliente; (iv) Somente pessoas motivadas e responsáveis apresentam alto desempenho; (v) Compartilhe abertamente e copie com orgulho; (vi) Foque no processo; (vii) Aprenda rapidamente com seus acertos e erros; (viii) Respeito, apoie e desafie seus parceiros e fornecedores; e (ix) Simplifique!

Para fortalecer a cultura de excelência operacional na organização, uma meta de ao menos dois *kaizens* implementados por ano é atribuída aos supervisores de produção. Para isso, esses profissionais recebem um treinamento denominado *kaizen driver*, que os habilita na condução das ações de melhoria. Além de contar com a participação dos operadores e supervisores de produção, a estrutura organizacional voltada à excelência operacional da Empresa A reúne diversos especialistas denominados “consultores *lean*”, que recebem treinamentos ao longo de um ano sobre a temática LSS e implementam projetos como parte do requisito de certificação interna. Contudo, o conceito de *kaizen* na Empresa A é gerenciado por meio de cinco níveis, de acordo com a sua complexidade e escopo das ações.

No primeiro nível (*quick wins*), as ideias simples são implementadas de forma imediata por parte dos operadores. O segundo nível é denominado *kaizen fast* e envolve a implementação de melhorias em um período de um ou dois dias. O *kaizen* tradicional representa o terceiro nível e sua implementação acontece no formato de *workshop* de 5 dias. No quarto nível estão incluídos os projetos de maior escopo (*six weeks project*), que impactam nas metas de maior relevância e duram aproximadamente seis semanas. Por fim, o último nível é denominado *expert project* e abrange projetos com duração superior a três meses e envolve especialistas com proficiência em técnicas mais avançadas (incluindo ferramentas estatísticas e técnicas específicas da abordagem seis sigma).

#### 4.2.1.2 Tecnologias I4.0 da Empresa A

Em 2019 a Empresa A iniciou uma estratégia de conversão para a I4.0 por meio de um modelo de implementação de projetos estruturado em dez pilares. Contudo, diversas tecnologias digitais, tais como computação em nuvem, *Big Data* e IoT já haviam sido implementadas no chão de fábrica. A Figura 11 ilustra os dez pilares que refletem o entendimento sobre a I4.0 na organização. Essa figura foi reproduzida com base na imagem ilustrada nos computadores da empresa. Observa-se que o modelo reúne nove tecnologias habilitadoras da I4.0 mais o pilar “pessoas” para nortear as ações de desenvolvimento das competências necessárias ao processo de conversão para a manufatura digital (AE01; PL01).

Figura 11 - Os dez pilares da Indústria 4.0



Fonte: Dados da Empresa A

O processo de fabricação da Empresa A emprega a robótica colaborativa nas atividades de montagem do eixo dos caminhões, aplicação de cola e silicone. No período de realização deste estudo, a empresa iniciou um projeto de implementação de um COBOT na seção de montagem de cabines para a movimentação de peças de pequenas dimensões (PL01).

A manufatura aditiva vem sendo utilizada na Empresa A para a produção de protótipos. Contudo, estudos para a impressão de peças em metal estão em fase inicial de desenvolvimento e são gerenciados por um time dedicado a essa tecnologia (pilar manufatura aditiva). A integração de sistemas envolve a arquitetura de automação (incluindo sensores de torque), sistemas MES, IHM, controle de qualidade e sequenciamento da produção (GS01).

Um exemplo de aplicação IoT é a implementação de AGVs e AIVs (*Autonomous Intelligent Vehicle*) como suporte às atividades logísticas (interna e externa), montagem de painéis, bancos e para-brisas dos caminhões. A Empresa A possui mais de sessenta unidades desses veículos que se comunicam com o sistema supervisorio por meio das tecnologias RFID, *bluetooth*, *WiFi* e sensores. Todos os caminhões de fornecedores recebem um *tag* na entrada da fábrica de modo que possam ser monitorados por um sistema supervisorio. Enquanto os “AIVs inteligentes” possuem autonomia de deslocamento para fazer o abastecimento dos postos de trabalho, os AGVs são capazes de se comunicarem com as apertadeiras eletrônicas informando o torque necessário à operação (AT01; GM01; GQ01).

Dados gerados nos recursos do chão de fábrica provenientes das apertadeiras, robôs, AIVs e AGVs são armazenados em um *data lake* para alimentar sistemas de inteligência artificial e *Big Data Analytics* a fim de monitorar a qualidade dos produtos, detectar falhas e identificar padrões entre os dados. Além disso, a nova linha de cabinas tem realizado testes com óculos de realidade aumentada e exoesqueleto (estrutura de suporte ao colaborador projetada ergonomicamente para ajudar na execução de movimentos repetitivos) para otimizar as atividades operacionais e aumentar a segurança no ambiente de trabalho (PL01).

Todas essas informações foram extraídas de depoimentos e documentos internos da organização. Contudo, para captar a percepção individual dos entrevistados quanto à implementação dessas tecnologias foi aplicado um questionário com um conjunto de doze questões fechadas, com escala de 1 a 5 pontos, conforme apresentado na seção 3.2.5. Considerando que essas questões são de natureza categórica, o critério adotado para a relevância das respostas foi o Índice de Respostas Favoráveis (IRF), que representa a soma das frequências nos itens (4) “concordo” e (5) “concordo totalmente”. A Tabela 1 mostra a distribuição na frequência das respostas obtidas com os quatorze colaboradores entrevistados, onde destacam-se as tecnologias: T1 – *Big Data Analytics*; T2 – Robótica Avançada; T4 – Integração horizontal/vertical; T5 – *IoT*; T6 – Cibersegurança; T7 – Computação em nuvem; T10 – *RFID*; e T11 – *AGVs*. Tais tecnologias apresentaram IRF acima de 50% e mediana maior ou igual a 4,0. O coeficiente alpha de Cronbach obtido para esse grupo de questões foi de 0,8621, o que demonstra a consistência e confiabilidade dos dados coletados.

Tabela 1 - Percepção dos entrevistados quanto ao uso das tecnologias I4.0 na Empresa A

Questões	1	2	3	4	5	Índice de Respostas Favoráveis (IRF)
	Discordo Totalmente	Discordo	Nem discordo, nem concordo	Concordo	Concordo Totalmente	
Frequência das Respostas (%)						
<b>T1. A empresa coleta e analisa uma grande quantidade de dados digitais provenientes da fábrica.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>14,29</b>	<b>50,00</b>	<b>35,71</b>	<b>85,71</b>
<b>T2. A empresa possui robôs autônomos ou colaborativos.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>28,58</b>	<b>35,71</b>	<b>35,71</b>	<b>71,42</b>
T3 Simulações são usadas para espelhar o mundo físico e melhorar o processo.	7,14	21,43	21,43	35,71	14,29	50,00
<b>T4 Informações sobre o processo de fabricação são integradas verticalmente e horizontalmente.</b>	<b>0,00</b>	<b>14,29</b>	<b>28,58</b>	<b>14,29</b>	<b>42,86</b>	<b>57,15</b>
<b>T5 A empresa utiliza IIoT para a comunicação em tempo real dos recursos produtivos.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>7,14</b>	<b>42,86</b>	<b>50,00</b>	<b>92,86</b>
<b>T6 A empresa garante o acesso e a comunicação segura dos dados gerados nos CPS.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>21,43</b>	<b>28,58</b>	<b>50,00</b>	<b>78,58</b>
<b>T7 Os dados digitais provenientes dos CPS são armazenados em nuvem.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>7,14</b>	<b>50,00</b>	<b>42,86</b>	<b>92,86</b>
T8 A empresa utiliza manufatura aditiva para produzir peças e/ou sobressalentes.	0,00	14,29	42,86	35,71	7,14	42,85
T9 A empresa utiliza Realidade Aumentada no processo de manufatura.	14,29	0,00	57,14	28,58	0,00	28,58
<b>T10 A empresa utiliza RFID para a comunicação entre produtos/recursos produtivos.</b>	<b>0,00</b>	<b>14,29</b>	<b>0,00</b>	<b>21,43</b>	<b>64,28</b>	<b>85,71</b>
<b>T11 A empresa utiliza AGVs ou drones para promover a logística interna da fábrica.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>50,00</b>	<b>50,00</b>	<b>100,00</b>
T12 A empresa utiliza inteligência artificial/ <i>machine learning</i> para otimizar a manutenção das máquinas.	0,00	35,71	35,71	28,58	0,00	28,58

Fonte: Dados da Empresa A

#### 4.2.1.3 Pontos de convergência evidenciados na Empresa A

A análise dos treze PCs extraídos da literatura e organizados na estrutura de análise da pesquisa partiu da identificação dos PCs mais aderentes ao processo de montagem dos caminhões na Empresa A, segundo a percepção dos entrevistados. A Tabela 2 mostra as informações referentes à frequência das notas atribuídas às treze questões relacionadas aos PCs. Seguindo o mesmo procedimento descrito na seção anterior, os PCs implementados na Empresa A foram priorizados para uma investigação mais aprofundada por meio do IRF, são eles: PC1, PC2, PC4, PC5, PC6, C7, PC9, PC10 e PC12. O alpha de Cronbach para esse grupo de questões é de 0,8024, o que evidencia a confiabilidade das respostas fornecidas pelos entrevistados.

Tabela 2 - Percepção dos entrevistados quanto aos PCs na Empresa A

Questões	1	2	3	4	5	Índice de Respostas Favoráveis (IRF)
	Discordo Totalmente	Discordo	Nem discordo, nem concordo	Concordo	Concordo Totalmente	
Frequência das Respostas (%)						
PC1. Mapeamento de processos auxiliado por CPS, <i>Big Data</i> e Simulação.	0,00	0,00	35,71	42,86	21,43	64,29
PC2. Medição de desempenho por meio de CPS e <i>Big Data Analytics</i> .	0,00	0,00	0,00	57,14	42,86	100,00
PC3. QFD auxiliado por <i>Big Data Analytics</i> .	0,00	7,14	71,43	14,29	7,14	21,43
PC4. Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS e <i>Big Data Analytics</i>	0,00	0,00	35,71	42,86	21,43	64,29
PC5. Monitoramento de máquinas por meio de CPS e <i>Big Data Analytics</i> .	0,00	14,29	21,43	57,14	7,14	64,28
PC6. Logística interna auxiliada por CPS e AGV	0,00	0,00	14,29	35,71	50,00	85,71
PC7. Projeto de células de manufatura com auxílio de robótica avançada e CPS.	7,14	14,29	21,43	42,86	14,29	57,15
PC8. Uso de <i>Data Science</i> para a redução de tempos de <i>setup</i> .	0,00	0,00	71,43	21,43	7,14	28,57
PC9. Digitalização do controle de estoques ( <i>e-kanban</i> ).	0,00	0,00	0,00	57,14	42,86	100,00
PC10. Monitoramento e controle da produção em tempo real.	0,00	0,00	7,14	42,86	50,00	92,86
PC11. Controle da qualidade com o auxílio de robótica avançada.	0,00	35,71	21,43	21,43	21,43	42,86
PC12. <i>Mistake proofing</i> com o auxílio de CPS ou inteligência artificial.	0,00	0,00	21,43	42,86	35,71	78,57
PC13. Uso de realidade aumentada para auxiliar atividades operacionais.	0,00	14,29	57,14	28,57	0,00	28,57

Fonte: Dados da Empresa A

Uma vez evidenciado os PCs com maior aderência ao processo analisado na Empresa A (o que), segundo a percepção dos entrevistados, a pesquisa foi direcionada para o entendimento a respeito dos requisitos técnicos necessários (como), assim como os resultados obtidos (porque) a partir dessa implementação. A seguir, apresenta-se uma narrativa do processo investigativo a respeito de cada categoria da estrutura de análise da pesquisa, destacando as declarações dos participantes.

**PC1 – Mapeamento de processos auxiliado por CPS, *Big Data* e Simulação.** Com a implementação dos AGVs/AIVs, a linha de produção tornou-se mais dinâmica, fazendo com que os desperdícios na linha de montagem oscilem ao longo do processo. Neste contexto, o VSM tradicional não é capaz de “enxergar” todos os problemas na fábrica. Contudo, a Empresa A tem implementado algumas iniciativas (incluindo *Big Data Analytics*) para a identificação dos desperdícios na planta industrial, a partir da análise dos dados gerados por AGVs e AIVs (GO01; AE01). A declaração a seguir descreve a opinião de um entrevistado a respeito do uso de simulação para auxiliar o mapeamento de processos:

Simulação eu acho interessante para um processo ainda embrionário, que ainda esteja em fase de projeto. Mas isso não quer dizer que você não possa usar a simulação no processo implementado. Com simulação a gente consegue ver a real taxa de utilização e alocar o número certo de pessoas para executar as atividades que agrem valor ao produto. (PL01).

A digitalização da linha de montagem também permitiu a identificação de gargalos e essa informação foi utilizada em um projeto para o mapeamento e aumento da produtividade da linha. Conforme declaração do Analista Técnico de Produção (AP01): “*Essa questão de análise dos dados digitais me ajudou muito na identificação de qual posto era gargalo ou não, aí a gente já começou a verificar o que estava acontecendo no processo físico*”. Deste modo, a implementação de um CPS pode contribuir não apenas com a atividade de mapeamento de processos no âmbito dos projetos LSS, mas também com o gerenciamento de gargalos e a implementação da teoria das restrições (*Theory of Constraints - TOC*), bem como a integração entre as abordagens LSS e TOC (*Theory of Constraints Lean Six Sigma – TLS*).

**PC2 – Medição de desempenho por meio de CPS e *Big Data Analytics*.** As variáveis de controle do processo, tais como qualidade, rastreabilidade da produção e OEE, são monitoradas *on-time*. Contudo, a medição desses indicadores auxiliada por CPS encontra-se parcialmente implementada na Empresa A, considerando que algumas métricas importantes, como por exemplo, absenteísmo, eficiência, entre outras, ainda não estão disponíveis em tempo real. Além disso, a digitalização do sistema de medição ainda não é sistêmica, como por exemplo, o controle do OEE, cujo monitoramento digital é restrito ao setor de estamperia (GO01). A integração de sistemas é um requisito importante para a implementação deste PC, conforme destacado por um gerente de manutenção:

Eu acho interessante a medição do OEE com a aquisição de dados automatizada, segura e com maior precisão. Nós temos isso em algumas áreas aqui, mas nós temos outros indicadores que também são importantes, como a proporção entre manutenção corretiva e preventiva, *backlog*, MTBF e MTTR. Essas informações são coletadas por meio de um sistema ERP que disponibiliza um grande pacote de dados para o tratamento no *software* PowerBI. Então hoje eu tenho todas essas informações disponíveis no ERP, mas a análise ainda não é feita em tempo real (GM01).

**PC4 – Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS e *Big Data Analytics*.** O monitoramento estatístico de processo na Empresa A é realizado por meio de um *software* que está conectado a um banco de dados. Contudo, há casos em que a ausência de conectividade entre ferramentas, máquinas e sistemas faz com que a coleta e o registro dos dados sejam executados ainda por meio de uma planilha eletrônica para posterior análise de capacidade (GQ01). A declaração a seguir resume a situação atual a respeito da implantação deste PC:

Nós temos um sistema que faz monitoramento estatístico em tempo real nas máquinas que estão conectadas à nossa camada de automação. Esse sistema gera alertas quando a máquina começa a sair da curva normal para que, a partir disso, seja feita uma intervenção humana de forma mais direcionada. A máquina não corrige automaticamente, mas fornece informação de que ela está saindo da normalidade da operação. Com isso a gente pode atuar de modo mais preciso nas máquinas que realmente necessitam de uma intervenção ao invés de monitorar todas as máquinas dentro de uma periodicidade (AE01).

**PC5 – Monitoramento de máquinas por meio de CPS e *Big Data Analytics*.** Esta prática ainda não está totalmente sistematizada na empresa, mas já é possível utilizar análise preditiva de forma complementar às medidas tradicionais de análise de falhas, como por exemplo, número de ciclos, tempo de vida útil e condição do equipamento (GM01). A partir de algumas iniciativas em *Big Data Analytics*, o acesso às informações tornou-se mais rápido e preciso, proporcionando velocidade de reação quando ocorre alguma anomalia. Deste modo, com base em dados históricos é possível prever determinadas situações para a implementação de ações preditivas e preventivas no processo (AE01). Tal ideia foi elucidada pelo entrevistado da seguinte forma:

É totalmente possível prever falhas com base nas informações oriundas do chão de fábrica. Quando você entra no campo da análise preditiva (que aí entra a grande contribuição da indústria 4.0), você chega num ponto ideal de trabalho. A cada três meses eu vou lá e troco aquele rolamento, mas será que ele não aguentava mais tempo? Eu não posso passar essa troca para quatro meses e depois dar um *downtime* na planta, então ficamos nesse dilema... Com o *Big Data*, técnicas avançadas de manutenção e analítica você consegue trabalhar melhor a manutenção preditiva (GM01).

**PC6 – Logística interna auxiliada por CPS e AGV.** Foram observados três exemplos pertinentes a este PC. O primeiro é o abastecimento das linhas de produção por meio de AGVs e AIVs. Os AIVs são capazes de transportar pequenas peças entre o armazém e doze estações de trabalho na linha de montagem de cabinas, podendo movimentar até 130 kg de material. Além disso, esse veículo reconhece a melhor rota para o abastecimento aumentando a produtividade e reduzindo erros na logística interna. Os AGVs, por outro lado, transportam os caminhões por toda a linha. Após o término de cada montagem, os AGVs retornam ao ponto inicial de forma autônoma e segura.

O segundo exemplo se refere ao armazenamento de itens com o auxílio de robôs e esteiras transportadoras automatizadas, que é um projeto em fase experimental, onde o operador não vai ter nenhuma interferência no armazenamento das peças (GQ01; PL01; AP01; GS01). Por fim, o Sistema de Transporte Aéreo das cabinas gerou ganhos de eficiência ao diminuir o manuseio (*handling*) em 80%, de acordo com documentos internos da empresa.

### **PC7 - Projeto de células de manufatura com auxílio de robótica avançada e CPS.**

A implementação de robótica colaborativa é um dos pilares do projeto I4.0 na Empresa A. O termo robótica abrange tanto robôs antropomórficos e colaborativos, como os AGVs e AIVs. Os COBOTs empregados nas atividades de pré-montagem estão sendo adaptados pelos fornecedores para que seja possível alocar um operador cadeirante na célula de fabricação. Por ser intuitiva, a programação deste COBOT, que pesa apenas 38 kg e opera com uma tensão elétrica de 220 volts, pode ser feita por qualquer operador e não requer capacitação especializada. A repetição dos movimentos é gravada e depois reproduzida em um *tablet* (PL01; AT02). No período da realização desta pesquisa, a Empresa A estava desenvolvendo um estudo para análise da eficiência e utilização do trabalho, onde a aplicação dos COBOTs seria direcionada para complementar a taxa de eficiência de um colaborador cadeirante. Quanto ao projeto de células de manufatura, a entrevista realizada com a planejadora destacou algumas particularidades dos COBOTs com relação ao balanceamento de linha:

Eu não sei se caberia colocar essa análise em um gráfico Yamazumi considerando mais uma coluna do gráfico, ou se ele (COBOT) teria que estar junto com um operador. Por exemplo, se eu tenho um gráfico Yamazumi com três operadores eu poderia criar quatro colunas (operadores + robô) ou três colunas, sendo que uma coluna agruparia um colaborador mais o robô. Tudo isso dependeria do processo, ou seja, se estariam trabalhando de forma colaborativa literalmente “mão com garra” (PL01).

De acordo com documentos institucionais, os COBOTs trabalham em sintonia com os operadores, aliviando os esforços em tarefas repetitivas. Ao dispor de braço duplo e garras flexíveis, os COBOTs servem como terceiro ou quarto braço de apoio aos operadores, permitindo o manuseio de qualquer objeto, com alto nível de precisão. Além disso, a implementação desses robôs não requer zonas restritas de uso, barreiras ou grades para a sua utilização.

**PC9 – Digitalização do controle de estoques (*e-kanban*).** A empresa implementou uma solução denominada “*WiFi push button*”, onde o operador solicita os materiais por meio de um dispositivo eletrônico e a reposição é feita diretamente do almoxarifado para a linha de produção por meio de empilhadeiras equipadas com tablets (GO01; PL02; GL01). Essa prática foi bem avaliada pelos operadores porque reduziu o tempo de abastecimento. O entrevistado PL02 declarou que um operador fez o seguinte comentário a respeito deste PC: “*Isso é muito bom porque antigamente eu via a minha caixa de peças esvaziando e tinha que correr atrás do empilhador para solicitar uma peça para fazer a montagem*”.

Contudo, observou-se que a solução piloto apresentou algumas restrições com relação ao funcionamento de sensores instalados em prateleiras e roletes, sensores óticos e cortinas de luz. Sendo assim, a implementação deste PC ainda está em fase de prova de conceito (GO01). Na visão do AP01: “A chamada de peças eletrônica gera menos desperdícios, porque antigamente a reposição era feita em diversas rotas e hoje ele (repositor) já vai na certeza de onde tem que entregar o material porque ele já recebeu a solicitação online da produção”.

O sistema de abastecimento digital emprega a tecnologia “*pick by light*”, onde a separação dos materiais é auxiliada por luzes que sinalizam automaticamente os locais de abastecimento nas estruturas de armazenagem agilizando o processo e reduzindo erros de troca de itens. Essa tecnologia já está implementada no setor de montagem de câmbio e em fase de implementação no setor de montagem de motores (PS01). A prova de conceito sobre os *e-kanbans* também abrange a logística de fornecimento, onde o sistema de reabastecimento para os fornecedores é dimensionado por meio dos *kanbans* digitais. Contudo, as oscilações semanais no volume de produção dificultam o fornecimento *just-in-time*, principalmente quando o volume requisitado pela fábrica é menor do que a quantidade planejada no início de cada mês. Neste cenário, os fornecedores acabam reivindicando o fornecimento nas quantidades planejadas *a priori* (GP01).

**PC10 – Monitoramento e controle da produção em tempo real.** A linha de produção de caminhões conta com 34 postos independentes que utilizam AGVs e AIVs para a movimentação e montagem do produto. As informações sobre esses equipamentos, tais como ritmo e status de operação, tempo de parada etc., são visualizadas em tempo real por meio de *smartphones* e monitores *touch screen*, caracterizando um sistema *Andon* digital (PL01; AP01; GS01). A gestão sem papel (*paperless*) também representa um ponto de melhoria decorrente da digitalização do processo, visto que o operador não depende mais do plano de controle impresso, pois as informações sobre as especificações estão disponíveis nos *smartphones* e telas, assim como não necessita se movimentar ao longo da fábrica para retirar planilhas impressas para o registro das operações em meio físico (GS01).

O monitoramento do abastecimento de materiais também é feito em tempo real por meio de IIoT e sistema *Andon* digital que mostra as chamadas não atendidas pelo almoxarifado permitindo que esses dados sejam analisados *a posteriori* para revisão dos níveis de estoques. Essa aplicação tem gerado ganhos de eficiência na logística interna na faixa de 20% a 25% (PL02).

**PC12 – *Mistake proofing* com auxílio de CPS ou inteligência artificial.** Em cada estação de trabalho, os operadores monitoram as atividades por meio de uma tela IHM com informações pertinentes ao *status* do processo, controle de qualidade, rastreabilidade, plano de controle, entre outras. Essas informações são transmitidas automaticamente por RFID. Além disso os crachás dos colaboradores enviam dados para a tela IHM via RFID. Caso um operador não atenda aos requisitos da matriz de habilidades de uma estação, o sistema não permite a execução da tarefa e bloqueia a linha (PL01). Outro exemplo é o autobloqueio de máquinas para o controle de itens de segurança (rodas, caixa de direção e eixo cardan). Assim, o AGV que movimenta o produto é liberado somente quando for detectado que os parafusos foram apertados com o torque especificado para a máquina (GQ01; AP01; AE01).

Dois soluções *mistake proofing* destacam-se no âmbito deste PC. O sistema de controle denominado “*air check*” detecta a ausência de determinados componentes estruturais em partes de difícil acesso para a inspeção. O sistema de visão mecânica permite a captura de imagens dos cabeçotes por meio de câmeras e sensores, onde esses dados são analisados em tempo real por meio de inteligência artificial, resultando no bloqueio automático da linha em condições de anomalia (GS01).

Além dos nove PCs priorizados pelos IRFs, é importante destacar que o **PC 13 - Uso de realidade aumentada para auxiliar atividades operacionais**, embora não destacado pelos entrevistados, foi mencionado em documentos da empresa, como parte dos dez pilares da I4.0 na organização. Essa tecnologia será implementada no processo de montagem inferior da cabina, com ênfase na manutenção preventiva e utilizará recursos de áudio, vídeo e documentos, com o propósito de reduzir o tempo na execução das atividades de manutenção e aumentar a qualidade dos serviços. Além disso, também foi observado o emprego de **manufatura aditiva**<sup>3</sup>, que será direcionada para a rápida prototipagem de peças.

#### 4.2.1.4 Requisitos técnicos e resultados da Empresa A

Os requisitos técnicos necessários para a implementação dos nove PCs apresentados resultaram em uma complexa arquitetura de automação e TI integradas por uma série de protocolos de comunicação capazes de conectar diversas tecnologias em um *data lake*, incluindo dispositivos móveis (*handheld*), *software*, *hardware*, robôs, sensores e atuadores, cabeamento, entre outros (GM01; AE01).

---

<sup>3</sup> Em 2017 mais de 150 peças foram produzidas em impressoras 3D na Empresa A.

Algumas soluções em computação em nuvem foram implementadas por meio de parcerias com fornecedores especializados (AT01). A integração entre dispositivos, máquinas e recursos de TI foi complexa em algumas áreas. Foi evidenciado que a seção de usinagem possuía alguns recursos produtivos com diferentes tecnologias IHM, tornando necessário um protocolo de comunicação para habilitar o monitoramento e o controle da produção em tempo real por meio de *smartphones* e monitores *touch* (AP01). Desta forma, a arquitetura de TI envolveu uma série de protocolos de comunicação, comunicação *wireless* e por meio de fibra ótica, sistema de cabeamento ponto-a-ponto, padronização de dispositivos móveis e sistemas operacionais (AT01; GM01).

A investigação dos **requisitos de automação** revelou que os componentes mais citados para a implementação dos CPS abrangem as tecnologias RFID, *wireless*, *bluetooth*, assim como o uso de CLPs, sensores e atuadores. Contudo, a análise da arquitetura e dos níveis de automação revelou uma certa heterogeneidade entre as diversas seções da planta investigada. Enquanto em algumas seções percebe-se a configuração em nível de rede, em outras (como a linha de montagem da cabine), observa-se a implementação de algoritmos de *machine learning* que caracterizam o estágio de otimização.

Conforme apresentado no Quadro 6, 57,14% dos entrevistados compreendem que a planta industrial se encontra atualmente no nível de redes, que permite a utilização do histórico de dados para prever problemas na fábrica. Por outro lado, 42,86% acreditam a planta se encontra no nível de otimização, onde algoritmos são usados para estabelecer relações de causa e efeito e recomendações para a tomada de decisão sobre falhas potenciais.

Quadro 6 - Nível de automação na Empresa A

Nível I	Nível II	Nível III	Nível IV	Nível V
<b>Conexão:</b> somente uso de sensores, controladores e dispositivos para coletar dados do mundo físico e monitorar o status de máquinas e processos.	<b>Controle:</b> os dados coletados do mundo físico são convertidos em informações úteis para controlar o processo de forma autônoma.	<b>Rede:</b> os dados coletados do mundo físico abrangem todas as máquinas e são centralizados em uma rede para comparar o desempenho dessas máquinas e usar o histórico de dados para prever problemas futuros.	<b>Otimização:</b> Algoritmos e IA são usados para gerar conhecimento sobre o processo e estabelecer relações de causa e efeito e fornecer recomendações para tomada de decisão e falhas potenciais.	<b>Autonomia:</b> o sistema tem autonomia e capacidade de auto-configuração para evitar falhas e defeitos. O conhecimento sobre o processo está disponível em tempo real.
<b>Frequência das Respostas (%)</b>				
0,00	0,00	57,14	42,86	0,00

Fonte: Dados da Empresa A

A análise dos **requisitos de competências** destacou o desenvolvimento de provas de conceitos (*Proof of Concept*) ou “PoCs”, como são identificados na organização. Esse tipo de iniciativa foi citado por diversos entrevistados e representa uma ação interna voltada para o aprendizado dos colaboradores a respeito da eficácia proporcionada pelas tecnologias I4.0. (AT01; GM01; GP01; GO01; AE01; PL02; GL01). Na visão dos entrevistados, tal prática tem-se mostrado útil para o desenvolvimento de habilidades e para o aprendizado das pessoas por meio de uma abordagem pragmática “*learn by doing*”. A declaração a seguir ilustra a importância desse tipo de iniciativa na Empresa A.

Estamos fazendo muitos PoCs, onde aproveitamos as ofertas das empresas para testar as soluções em diversos processos. Alguns dão certo e outros não, o que é bom também, porque a gente aprende com isso. Nesse momento de implantação, esse aprendizado com os erros é muito importante (AT01).

Desta forma, foi observado que os colaboradores que participaram dos projetos relacionados aos pilares I4.0 recebem treinamentos em técnicas de metodologias ágeis e de ideação (como por exemplo, *Scrum* e *Design Thinking*), que proporcionaram uma mudança cultural (GL01). Além disso, a Empresa A promove palestras e eventos sobre o tema com a participação de instituições parceiras nos projetos, bem como treinamentos de simulação<sup>4</sup> nas tecnologias implementadas relacionadas aos pilares I4.0 (AE01; PL02). Outro exemplo de ação para o desenvolvimento de competências é a promoção de intercâmbios entre plantas instaladas em outros países. Esse programa foi intitulado “*Expert Exchange*” e os participantes compartilham experiências sobre as melhores práticas implementadas nas fábricas (GM01).

A necessidade de profissionais da área de TI foi outro aspecto identificado na pesquisa. Segundo um gerente da qualidade, “*Para ter uma indústria 4.0 você tem que ter uma equipe de TI muito competente para fazer o link em um processo tradicional envolvendo muitas áreas, como por exemplo, planejamento, TI, produção, suprimentos etc.*” (GQ01). Essa questão também foi destacada por outro entrevistado, que declarou:

Se a gente não tivesse os colegas de TI do nosso lado em operações, construindo juntos as soluções que foram implementadas, com certeza nós estaríamos muito longe do ponto que estamos hoje. Então, essa integração e esse alinhamento de um modo muito próximo entre as áreas de operações e de TI é indispensável para ter uma implementação de tecnologias da indústria 4.0 com sucesso (AE01).

---

<sup>4</sup> Para esses treinamentos foram dedicadas mais de 1.200 horas com a participação de aproximadamente 1.000 colaboradores.

Antes de implementar os pilares I4.0, a Empresa A já vinha obtendo resultados com a filosofia *lean* em termos de qualidade, segurança, produtividade e redução de desperdícios no chão de fábrica. O programa TOS também gerou melhorias no processo de desenvolvimento tecnológico e motivou a organização a buscar a conversão para a manufatura digital a partir da integração dos sistemas informatizados e automação industrial (GS01). Neste contexto, a **análise dos resultados** decorrentes da implementação dos PCs na Empresa A demonstrou um alinhamento com os ganhos relacionados às iniciativas de excelência operacional (qualidade, custo e velocidade).

Segundo a percepção do GL01, a abordagem LSS deve anteceder a implementação dos pilares I4.0. Segundo esse entrevistado, “*Quando uma empresa automatiza um processo ruim, ela gera mais erros por segundo*” (GL01). A sinergia entre a abordagem LSS e as tecnologias I4.0 também foi destacada em um depoimento de um entrevistado:

A indústria 4.0 vem para alavancar a competitividade das empresas. Só que a gente não pode pensar que ela, por si só, irá alavancar a competitividade, se antes não tivermos processos enxutos e otimizados. Então é muito importante que os empresários tenham essa mentalidade de melhoria contínua, de redução de desperdício e análise da cadeia de valor nas suas operações, para que a partir daí eles possam utilizar as tecnologias da indústria 4.0 para alcançar um nível maior de competitividade (AE01).

De acordo com documentos institucionais, a transformação digital na linha de montagem de caminhões proporcionou ganhos de eficiência de 15 a 20%, redução no número de armazéns de peças (de 53 para 6), aumento do 125% na entrega de peças diretas na linha, e redução do tempo de armazenamento de componentes (de 10 dias para 3 dias). Desta forma, percebe-se que os ganhos mencionados estão relacionados com as métricas *lean*, tais como eficiência logística, *delivery* e produtividade.

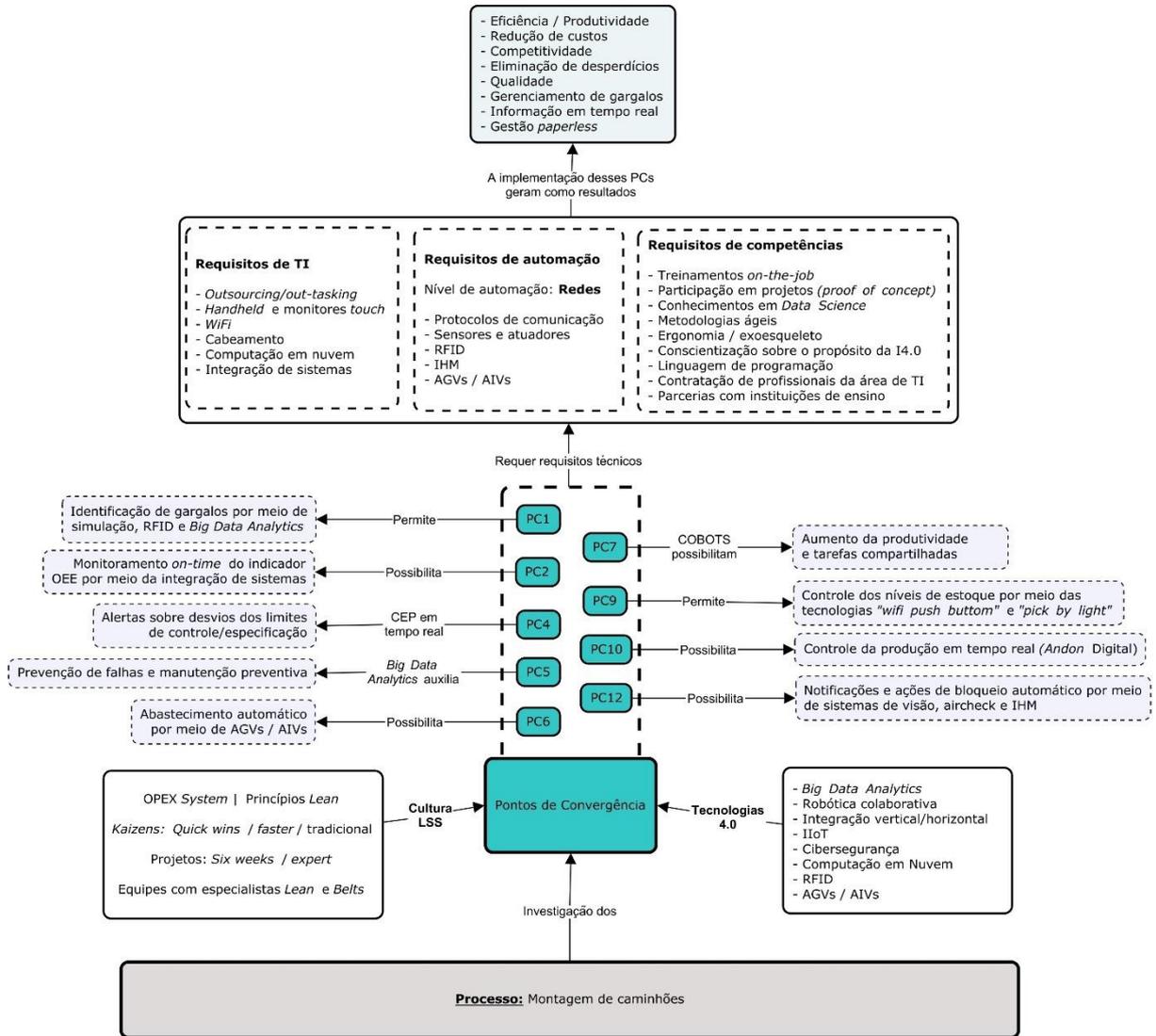
Com o objetivo de consolidar os elementos da estrutura de análise da pesquisa citados pelos entrevistados na Empresa A, foi elaborado o Quadro 7, que apresenta a frequência de ocorrência desses elementos. A síntese dessas informações está representada por meio de um mapa conceitual (Figura 12) de modo a destacar os principais elementos inerentes a estrutura de análise da pesquisa (que foram citados por mais de um entrevistado), as proposições e a relação significativa entre eles.

Quadro 7 - Categorias e componentes estruturais na Empresa A

Categorias	Frequência observada	Componentes das categorias da estrutura de análise da pesquisa	Entrevistados que citaram
PC1	2	Simulação	GO01; PL01
	2	Identificação de gargalos	GO01; AP01
	2	RFID	GO01; AE01
	2	<i>Big Data Analytics</i>	GO01; PL01
PC2	3	KPI automático	GO01; PL02; GL01
	2	OEE	GO01; GM01
	1	<i>Business Intelligence</i>	GM01
PC4	1	Banco de dados	GQ01
	1	Controle em tempo real/alerta automático	AE01
PC5	2	Análise preditiva	GM01; AE01
	2	<i>Big Data Analytics</i>	GM01; AT01
	1	Manutenção preventiva	AE01
PC6	4	AGVs e AIVs	GQ01; PL01; AP01; GS01
	1	Esteira transportadora automatizada	GQ01
PC7	2	COBOT	PL01; AT01
	2	Programação intuitiva	PL01; AT02
PC9	4	Chamada <i>online (WiFi button)</i>	GO01; AP01; GL01; PL02
	2	Sensores e cortina de luz ( <i>pick by light</i> )	GO01; PS01
PC10	3	AGVs e AIVs	PL01; GM01; GS01
	3	<i>Andon</i> digital	PL01; AP01; PL02
	2	<i>Smartphone</i> e telas <i>touch</i>	AP01; GS01
	2	RFID e IIoT	AE02; PL02
PC12	4	RFID	PL01; GQ01; AE01; AP01
	3	AGV	PL01; GQ01; AP01
	2	IHM	PL01; AP01
	1	Inteligência artificial	GS01
	1	Sistema de visão	GS01
	1	Sistema <i>aircheck</i>	GS01
Requisitos de TI	5	Integração de sistemas	GO01; PL01; DO01; AE01; AE02
	3	<i>WiFi</i>	GM01; PL02; GO01
	3	<i>Handheld</i> e monitores <i>touch</i>	AP01; GS01; PL02
	2	Sistemas operacionais	GM01; AE01
	2	<i>Outsourcing/out-tasking</i>	AT01; PL01
	2	Cabeamento	GM01; GS01
	2	Computação em nuvem	AE02; AT01
	1	<i>Bluetooth</i>	GM01
1	<i>Machine Learning</i>	AP01	
Requisitos de automação	6	RFID	PL01; GM01; GO01; GQ01; GP01; AE02
	5	Protocolos de comunicação	AT02; GM01; AP01; AE01; GS01
	5	AGVs e AIVs	PL01; AT01; GM01; GS01; GQ01
	3	Sensores e atuadores	GO01; PL01; AT02
	2	IHM	PL01; AP01
1	Contrato " <i>Turn Key</i> "	PL01	
Requisitos de competência	5	Aprendizado por meio de <i>PoCs</i>	AT01; GM01; GP01; PL02; GL01
	5	workshops e treinamento <i>on-the-job</i>	AE01; AE02; PL02; GL01; PL01
	4	Conscientização sobre o propósito da I4.0	GO01; AT02; GM01; AP01;
	4	Envolvimento em projetos ( <i>learn by doing</i> )	GO01; PL01; GM01; AE01
	3	Análítica ou <i>Data Science</i>	DO01; GO01; AE02
	3	Parceria com instituições de ensino	PL01; GM01; AE02
	2	Metodologias ágeis	PL02; GL01
	2	Ergonomia / exoesqueleto	PL01; AP01
2	Linguagem de programação	PL01; GM01	
2	Contratação de profissionais da área de TI	GQ01; AE01	
Resultados	10	Eficiência / produtividade	GO01; AT01; AT02; GM01; GQ01; AE01; PL02; AP01; GP01; GS01
	5	Competitividade	PL01; AT01; AT02; AE01; PL02
	5	Redução de custo	AT02; GM01; AP01; GS01; PL02
	4	Informação em tempo real	PL01; GQ01; AP01; GL01
	4	Redução de desperdícios	GM01; AE01; GS01; AP01
	3	Padronização e gestão <i>paperless</i>	PL01; GS01; PL02
	3	Qualidade	GS01; PL01; AP01
	2	Gerenciamento de gargalos	PL01; AP01
	2	Segurança	GS01; PL02
	1	Velocidade	PL01;

Fonte: Dados da Empresa A

Figura 12 - Mapa conceitual da Empresa A



Fonte: Dados da Empresa A

### 4.3 EMPRESA B

A Empresa B fabrica componentes estruturais para caminhões leves e pesados abrangendo estruturas de chassi, trilhos laterais, travessas para carroceria, módulos de suspensão e tanques de combustível. A organização foi fundada em 1956 e hoje conta com uma força de trabalho com mais de dez mil colaboradores empregados em 200 centros de operações e tecnologia distribuídos em dezesseis países. A matriz está localizada na cidade de Monterrey (México) e possui uma capacidade produção anual de três milhões de chassis e um milhão de longarinas para caminhões que são exportados para diversos países da América, Europa e África. A Empresa B atua no Brasil por meio de duas fábricas instaladas em dois Estados (São Paulo e Paraná), que hoje empregam mais de trezentos colaboradores.

O estudo de caso foi desenvolvido no segundo semestre de 2019, na unidade industrial localizada no Estado de São Paulo, a qual concentra a produção de longarinas e quadros de chassi para ônibus e caminhões. A produtividade no chão de fábrica é um requisito competitivo na organização. A cada 50 minutos, são entregues 6 chassis, somando 128 unidades por dia. De acordo com documentos institucionais, o processo de conversão ao modelo de Indústria 4.0 na Empresa B vem sendo liderado por equipes multifuncionais por meio da implementação de projetos pilotos. Dentre esses projetos, destacam-se a inspeção no processo de recebimento de materiais com realidade aumentada, a integração vertical de sistemas (PLC, MES, ERP e PowerBI) para otimizar o sistema de medição da empresa, aplicações de manufatura aditiva para a produção de dispositivos e protótipos, automação de tarefas administrativas por meio de tecnologia *Robotic Process Automation* (RPA), a utilização de sistema de inspeção por visão computacional, entre outros.

#### 4.3.1 Análise dos resultados na Empresa B

A pesquisa na Empresa B foi conduzida seguindo os mesmos procedimentos adotados para a coleta e análise de dados na Empresa A, conforme protocolo de estudo de caso. O Quadro 8 apresenta o perfil dos entrevistados na Empresa B. A soma do tempo de todas as gravações das entrevistas foi de 376 minutos (média igual a 46,97 minutos por entrevista). A quantidade de entrevistados na Empresa B foi menor do que na Empresa A devido, primeiramente, ao porte da organização (A Empresa B é classificada como médio porte, enquanto a Empresa A é classificada como de grande porte), bem como ao número de pessoas envolvidas nos projetos de digitalização e implementação de tecnologias I4.0.

Quadro 8 - Perfil dos entrevistados na Empresa B

Entrevistados	Cargo (Código)	Tempo de experiência na empresa	Área de Formação	Formação em Excelência Operacional
1	Diretor de Tecnologia e Inovação (DT01)	21 anos	Engenharia Elétrica	Praticante <i>Lean</i> (in company)
2	Assistente de Engenharia (AE03)	3 anos	Engenharia de Produção	<i>Yellow Belt LSS</i>
3	Analista de Manutenção Sênior (AM01)	8 anos	Engenharia Elétrica	Praticante <i>Lean</i> (in company)
4	Desenvolvedor MES (DM01)	5 anos	Análise de Sistemas	Praticante <i>Lean</i> (in company)
5	Gerente de Engenharia de Processos e Qualidade (GP02)	7 anos	Engenharia de Produção	Praticante <i>Lean</i> (in company)
6	Analista da Qualidade (AQ01)	16 anos	Engenharia da Qualidade	Praticante <i>Lean</i> (in company)
7	Analista da Qualidade (AQ02)	8 anos	Engenharia Mecânica	<i>White Belt</i> e Praticante <i>Lean</i> (in company)
8	Assistente de Produção (AP02)	4 anos	Engenharia Mecânica	<i>Black Belt LSS</i>

Fonte: Dados da Empresa B

#### 4.3.1.1 Caracterização do processo e cultura LSS na Empresa B

A estrutura de excelência operacional da Empresa B conta com especialistas *Lean*, *Yellow Belts*, *Green Belts* e *Black Belts*. Contudo, considerando que a estratégia organizacional é priorizar a implementação do *Lean Manufacturing*, a empresa optou por identificar os projetos Seis Sigma (que usam a estrutura DMAIC) como “Projetos de Estatística Avançada”. Neste sentido, a empresa prefere não utilizar a denominação “Seis Sigma ou DMAIC” em seus projetos de melhoria contínua. Além disso, a empresa implementou um programa denominado Cartão de Comunicação Direta (CCD), que estimula a condução de *kaizens* diários. Nesse programa, qualquer colaborador pode iniciar uma ação de melhoria.

A empresa também implementa *kaizens* denominados *Material Information Flow Chart* (MIFC), que substitui o tradicional VSM. Atualmente, os eventos *kaizens* são implementados no formato de *workshop* com duração média de cinco dias e direcionados para temas específicos, incluindo MIFC, padronização, SMED, entre outros.

#### 4.3.1.2 Tecnologias I4.0 na Empresa B

A estratégia de conversão digital na Empresa B faz parte de um planejamento estratégico denominado “*High Level Plan*”, estabelecido para um horizonte de seis anos. Para operacionalizar essa estratégia foram implementados na unidade projetos pilotos envolvendo fornecedores e agência de fomento (GP02). Dentre as primeiras iniciativas voltadas para a implementação de tecnologias I4.0 observadas em documentos internos da empresa, destacam-

se (GP02): inspeção de recebimento com utilização de realidade aumentada; sensoriamento de máquinas para posterior análise de dados; OEE em tempo real por meio da integração de sistemas; Emprego de RPA para automação de tarefas administrativas; utilização de impressora 3D para dispositivos e protótipos; sistemas de inspeção por visão computacional; sistemas de medição integrados aos CPLs das máquinas; sistemas de controles de acesso com RFID; e testes piloto com robótica colaborativa.

A Tabela 3 mostra a frequência obtida para as doze questões fechadas relacionadas às tecnologias I4.0 implementadas na Empresa B, segundo a percepção dos colaboradores entrevistados. Neste contexto, destacam-se as seguintes tecnologias: T1 – *Big Data Analytics*; T4 – Integração horizontal/vertical; T5 – *IoT*; T6 – Cibersegurança; T7 – Computação em nuvem; T8 – Manufatura aditiva; e T10 – RFID. Tais tecnologias apresentaram IRF acima de 50% e mediana maior ou igual a 4,0. O alpha de Cronbach obtido para esse grupo de questões foi de 0,7679 e demonstra a confiabilidade das respostas obtidas nas entrevistas.

Tabela 3 - Percepção dos entrevistados quanto ao uso das tecnologias I4.0 na Empresa B

Questões	1	2	3	4	5	Índice de Respostas Favoráveis (IRF)
	Discordo Totalmente	Discordo	Nem discordo, nem concordo	Concordo	Concordo Totalmente	
Frequência das Respostas (%)						
<b>T1. A empresa coleta e analisa uma grande quantidade de dados digitais provenientes da fábrica.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>37,50</b>	<b>37,50</b>	<b>25,00</b>	<b>62,50</b>
T2. A empresa possui robôs autônomos ou colaborativos.	25,00	12,50	25,00	25,00	12,50	37,50
T3 Simulações são usadas para espelhar o mundo físico e melhorar o processo.	12,50	12,50	62,50	12,50	0,00	12,50
<b>T4 Informações sobre o processo de fabricação são integradas verticalmente e horizontalmente.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>25,00</b>	<b>62,50</b>	<b>12,50</b>	<b>75,00</b>
<b>T5 A empresa utiliza IIoT para a comunicação em tempo real dos recursos produtivos.</b>	<b>25,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>50,00</b>	<b>25,00</b>	<b>75,00</b>
<b>T6 A empresa garante o acesso e a comunicação segura dos dados gerados nos CPS.</b>	<b>0,00</b>	<b>25,00</b>	<b>0,00</b>	<b>37,50</b>	<b>37,50</b>	<b>75,00</b>
<b>T7 Os dados digitais provenientes dos CPS são armazenados em nuvem.</b>	<b>0,00</b>	<b>12,50</b>	<b>12,50</b>	<b>50,00</b>	<b>25,00</b>	<b>75,00</b>
<b>T8 A empresa utiliza manufatura aditiva para produzir peças e/ou sobressalentes.</b>	<b>12,50</b>	<b>0,00</b>	<b>12,50</b>	<b>0,00</b>	<b>75,00</b>	<b>75,00</b>
T9 A empresa utiliza Realidade Aumentada no processo de manufatura.	25,00	37,50	12,50	25,00	0,00	25,00
<b>T10 A empresa utiliza RFID para a comunicação entre produtos/recursos produtivos.</b>	<b>0,00</b>	<b>12,50</b>	<b>25,00</b>	<b>50,00</b>	<b>12,50</b>	<b>62,50</b>
T11 A empresa utiliza AGVs ou drones para promover a logística interna da fábrica.	75,00	12,50	0,00	12,50	0,00	12,50
T12 A empresa utiliza inteligência artificial/ <i>machine learning</i> para otimizar a manutenção das máquinas.	25,00	25,00	37,50	0,00	12,50	12,50

Fonte: Dados da Empresa B

#### 4.3.1.3 Pontos de convergência da Empresa B

A análise dos PCs partiu da identificação das práticas mais aderentes ao processo de fabricação de longarinas e quadros de chassi na Empresa B, segundo a percepção dos entrevistados. A Tabela 4 mostra as informações referentes à frequência das notas atribuídas às treze questões relacionadas aos PCs. Deste modo, foram priorizados para uma investigação mais aprofundada os seguintes PCs: PC1; PC2; PC3; PC4; PC9; PC10; e PC12. Embora o coeficiente Alpha de Cronbach para esse grupo de questões esteja no limite do valor recomendado pela literatura (0,60), sendo igual a 0,6022, Hora *et al.*, (2010) explicam que quando questionários com escalas são aplicados para especialistas, existe uma tendência natural de baixa variância nas respostas, fazendo com que o valor  $\alpha$  seja menor para amostras heterogêneas. Assim, ao contrário da Empresa A, onde os entrevistados tiveram atuação em projetos específicos (pilares I4.0), de acordo com suas especialidades, os entrevistados na Empresa B participaram em todos os projetos ligados à I4.0 na organização, constituindo uma equipe multidisciplinar heterogênea quanto as áreas de formação. Tal fato pode ter contribuído para um menor valor de  $\alpha$  para esse grupo de questões.

Tabela 4 - Percepção dos entrevistados quanto aos PCs na Empresa B

Questões	1	2	3	4	5	Índice de Respostas Favoráveis (IRF)
	Discordo Totalmente	Discordo	Nem discordo, nem concordo	Concordo	Concordo Totalmente	
Frequência das Respostas (%)						
<b>PC1. Mapeamento de processos auxiliado por CPS, Big Data e Simulação.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>37,50</b>	<b>25,00</b>	<b>37,50</b>	<b>62,50</b>
<b>PC2. Medição de desempenho por meio de CPS e Big Data Analytics.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>37,50</b>	<b>62,50</b>	<b>100,00</b>
<b>PC3. QFD auxiliado por Big Data Analytics.</b>	<b>0,00</b>	<b>12,50</b>	<b>12,50</b>	<b>37,50</b>	<b>37,50</b>	<b>75,00</b>
<b>PC4. Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS e Big Data Analytics</b>	<b>0,00</b>	<b>12,50</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>87,50</b>	<b>87,50</b>
PC5. Monitoramento de máquinas por meio de CPS e Big Data Analytics.	12,50	12,50	37,50	0,00	37,50	37,50
PC6. Logística interna auxiliada por CPS e AGV.	62,50	12,50	12,50	0,00	12,50	12,50
PC7. Projeto de células de manufatura com auxílio de robótica avançada e CPS.	75,00	12,50	0,00	0,00	12,50	12,50
PC8. Uso de Data Science para a redução de tempos de setup.	12,50	25,00	25,00	12,50	25,00	37,50
<b>PC9. Digitalização do controle de estoques (e-kanban).</b>	<b>12,50</b>	<b>0,00</b>	<b>12,50</b>	<b>50,00</b>	<b>25,00</b>	<b>75,00</b>
<b>PC10. Monitoramento e controle da produção em tempo real.</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>25,00</b>	<b>37,50</b>	<b>37,50</b>	<b>75,00</b>
PC11. Controle da qualidade com o auxílio de robótica avançada.	50,00	0,00	37,50	0,00	12,50	12,50
<b>PC12. Mistake proofing com o auxílio de CPS ou inteligência artificial.</b>	<b>0,00</b>	<b>12,50</b>	<b>12,50</b>	<b>25,00</b>	<b>50,00</b>	<b>75,00</b>
PC13. Uso de realidade aumentada para auxiliar atividades operacionais.	37,50	12,50	37,50	12,50	0,00	12,50

Fonte: Dados da Empresa B

A investigação a respeito dos sete PCs priorizados na Empresa B (o que) foi então direcionada para a identificação dos requisitos técnicos necessários (como), assim como os resultados obtidos (porque) a partir dessa implementação. Apresenta-se a seguir, uma narrativa sobre esses aspectos, com destaque para algumas declarações dos participantes.

**PC1 – Mapeamento de processos auxiliado por CPS, *Big Data* e Simulação.**

Atualmente, a organização possui boa parte da documentação pertinente aos processos de manufatura no formato eletrônico, incluindo folhas de operação, instruções de trabalho, planos de controle e mapas de processo. Contudo, existem registros relacionados ao processo de fabricação que ainda se encontram em meio físico.

O mapeamento das atividades e o plano de controle dos processos segue os requisitos do Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP), estabelecido no Processo de Aprovação da Peça de Produção (PPAP), que é amplamente utilizado na indústria automobilística. Embora a aplicação de técnicas de mapeamento e análise de processos implementados na organização (como por exemplo fluxogramas e FMEA) seja capaz de identificar características importantes para o controle das atividades, o uso de *Big Data* e simulação pode auxiliar na identificação de outras características menos comuns. (DT01). No entendimento do Diretor de Tecnologia e Informação:

O problema é o conjunto de variáveis que não são monitoradas e que, às vezes, acarretam uma série de ações que não permitem a eficiência subir acima de 95%. Para ir além disso é necessário um sistema de predição dos problemas de qualidade ao invés de apenas detectar falhas. É importante prever quando essa falha vai acontecer. É aí que a gente tem que ampliar o monitoramento e usar outras ferramentas analíticas (DT01).

**PC2 – Medição de Desempenho por meio de CPS e *Big Data Analytics*.** Este ponto de convergência foi inicialmente implementado por meio de um projeto que integrou o sistema MES, IoT, CLP, Power BI® e um servidor na nuvem. Antes da sua implementação, a empresa gerenciava o seu sistema de medição por meio do Microsoft Excel®. Em 2014 o sistema MES foi implementado para controlar a produção. A partir de 2017, esse sistema passou a ser integrado com o BI para monitorar alguns indicadores de desempenho por meio de *smartphones*, monitores e telas de TV. No das práticas LSS, destacam-se os indicadores de tempo de *setup*, produtividade, qualidade e OEE. Este último, é atualizado oito vezes ao dia (GP02). A operacionalização desse PC é explicada de forma sucinta na declaração abaixo.

90% dos dados da fábrica eu dispensei, porque eu não sei o que fazer com eles, os outros 10% eu carrego em um servidor local para gerar o *dashboard*. Esse *dashboard* é *online*, mas não instantâneo, porque a gente precisa somente da atualização diária (GP02).

O monitoramento digital dos processos de fabricação abrange as atividades de conformação e pintura por meio de CLPs e sistema supervisor SCADA. A edição de *pop-ups*, que são janelas que se abrem nas telas dos computadores, permite o registro de informações relevantes para o monitoramento do processo, tais como tempos e motivos de paradas, refugo, OEE etc. Conforme descrito pelo analista da qualidade:

Temos um banco de dados que armazena todos esses códigos de parada, por máquina. A plataforma de BI captura os dados da produção (registros de parada, quantidade produzida, problemas de qualidade etc.) através do MES. Então, esse sistema gera um relatório que reúne essas informações (AQ02).

**PC3 – QFD auxiliado por *Big Data Analytics*.** Embora a Empresa B não utilize o QFD em projetos LSS ou DFSS, o IRF para este item foi de 71,43%. Isso demonstra a percepção dos entrevistados quanto a possibilidade de uso de um grande volume de dados para auxiliar as atividades de levantamento das necessidades dos clientes. A declaração a seguir corrobora a possibilidade de integração entre os dois elementos.

Eu tive uma experiência há uns dois anos atrás com um cliente... Estávamos trabalhando em um problema de qualidade e utilizamos uma ferramenta de *machine learning*. Como a quantidade dos dados era grande, foi difícil fazer uma análise estatística visualmente com todos os dados. Por outro lado, uma pequena amostra não fornecia informação de comparação razoável. Então aí decidimos usar uma ferramenta específica para “clusterizar” esses dados e isso ajudou a ter um melhor entendimento sobre o que era relevante e que não era (DT01).

**PC4 - Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS e *Big Data Analytics*.** Os estudos de capacidade na Empresa B ocorrem da seguinte forma: os dados de *output* dos equipamentos de corte e conformação são coletados por meio de um dispositivo de medição e armazenados em um servidor local. Esses dados são comparados em tempo real com os limites de especificação estabelecidos pela área de qualidade e visualizados em cartas de controle digitais. Se o processo estiver fora dos limites de controle, o equipamento é bloqueado manualmente pelo operador e liberado apenas na presença de um auditor da qualidade. Além disso, esses dados são posteriormente utilizados em análises de tendência para ações preventivas. Embora a decisão sobre o bloqueio não seja automática, os dados são extraídos automaticamente, peça por peça. (AE03; AM01). Os benefícios proporcionados por esse PC foram declarados da seguinte forma:

Com a visualização em tempo real eu consigo ter um melhor controle do processo, porque é possível visualizar se ocorreu algum problema na máquina ou se essa máquina apresenta alguma tendência. Isso acontece de forma rápida e precisa, porque o envio dessa informação é via *wireless* (AE03).

**PC9 – Digitalização do controle de estoque (*e-kanban*).** Todos os estágios do processo de fabricação de componentes estruturais para veículos consomem algum tipo de material que deve estar disponível no tempo adequado e na quantidade necessária para a produção. Embora a reposição desses materiais ainda não seja realizada de forma automática, o controle digital dos estoques permite a identificação em tempo real das quantidades consumidas por meio de um sistema MES, que é alimentado com o auxílio de código de barras (AQ01).

Quando o operador retira do estoque uma determinada quantidade de um material específico, essa operação é registrada por meio de código de barras e apontamento no sistema MES. A atualização do saldo de cada componente é realizada automaticamente no sistema ERP. A partir de definições de ponto de reposição e estoque mínimo para cada estação, o operador pode ser informado sobre a retirada de materiais. Essa sistemática pode funcionar como um sistema *e-kanban* de retirada. O projeto para a digitalização do controle dos estoques exigiu a integração entre os sistemas MES e ERP, assim como a aquisição de impressoras, etiquetas e coletores de código de barras (AQ01; DM01; GP02). De acordo com a opinião de um entrevistado, “*Tem que ser considerado um divisor de águas essa questão do MES*” (AQ01).

**PC10 – Monitoramento e controle da produção em tempo real.** O monitoramento e controle dos processos na Empresa B têm como premissa a coleta de dados confiáveis no menor tempo possível. É neste contexto que o “Projeto de Fim de Curso” foi implementado. A arquitetura desse sistema incluiu a integração do sistema de *pop-ups* com os equipamentos de medição para permitir o monitoramento do processo em tempo real (AQ02). Conforme apresentado anteriormente no PC02, o sistema de *pop-ups* também auxilia a medição de desempenho em tempo real. A declaração a seguir reforça a importância desse PC:

Nós tínhamos um problema aqui, que é comum em boa parte das empresas que dependem de lançamento manual de apontamentos de produção e controle de qualidade, que é "acontece alguma coisa na fábrica e isso não é reportado" [...] isso atrapalha demais a análise de dados e a solução de problemas porque você não enxerga onde está a ineficiência (AQ02).

Outro exemplo observado *in loco* foi o monitoramento dos indicadores de quatro prensas de uma máquina perfiladeira. Nesse sistema, o CLP que controla a máquina possui uma programação que monitora o *status* do processo (“máquina trabalhando” ou “máquina parada”). Quando o CLP identifica que a máquina está parada, ele envia um sinal por meio de um sistema de luz inteligente (*smart light*) e dispara um *e-mail* ao técnico responsável pela máquina reportando o problema. Ao mesmo tempo, o sistema exibe um *pop-up* que informa os códigos de parada para que o operador registre a situação encontrada. Os dados gerados por esse sistema são utilizados para o cálculo do indicador OEE descrito no PC2 (AQ02).

**PC12 - *Mistake proofing* com o auxílio de CPS ou inteligência artificial.** A Empresa B possui duas aplicações de RFID voltadas para o bloqueio de erros ou anomalias na produção. A primeira é na área de corte a plasma, onde a cada 5 minutos o sistema operacional faz uma leitura dos *tags* instalados nos Equipamentos de Proteção Individual (EPI) dos operadores e compara essas informações com um cadastro de operadores habilitados para trabalhar na área. Desta forma, a máquina é liberada apenas para os operadores autorizados, visto que um dos grandes problemas em processos de corte a plasma e soldagem é eventualmente alocar alguém que não esteja habilitado na função (AQ02; GP02). A segunda aplicação é o controle da situação de calibração dos equipamentos e estudos de MSA (*Measurement System Analysis*), onde cada equipamento possui um *tag* que se conecta com o CLP da máquina para liberação ou bloqueio automático da operação, de acordo com a situação observada (AQ02).

Para auxiliar o controle da qualidade na linha de produção, a Empresa B implementou um sistema de visão e bloqueio digital, por meio de uma tecnologia de leitura da geometria do recorte das peças. Quando o sistema detecta um desvio dimensional, o processo é bloqueado automaticamente para a segregação da peça não-conforme. Esse sistema é integrado ao MES (AM01). Outro exemplo de *poka-yoke* digital foi observado na atividade de furação de abas dos componentes estruturais, onde o sistema identifica quantos furos necessitam ser realizados na peça e, em caso de anomalia, as peças são segregadas automaticamente (DM01). A seguinte declaração de um assistente de engenharia se mostra alinhada à implementação deste PC:

Eu acho que essa questão de bloquear atividades no sistema é um grande ganho para a qualidade, para que não tenha risco de a peça seguir para frente e tudo mais. Eu acredito que a indústria 4.0 e todas as ferramentas que ela possibilita tem um potencial para melhorar ainda mais (AE03).

#### 4.3.1.4 Requisitos técnicos e resultados da Empresa B

Dentre os **requisitos de T.I.** mais expressivos citados nas entrevistas, destacam-se a integração de sistemas (ERP-MES-CLP-BI), o uso banco de dados e protocolos de comunicação, a terceirização de recursos de T.I. (*outtasking*), conectividade (IoT, *Ethernet*), assim como a possibilidade de análise preditiva. Para viabilizar o estudo de capacidade por meio do CPS a organização precisou promover a integração de sistemas conectando computadores e redes com os equipamentos de medição. Foi desenvolvida uma arquitetura específica de TI para gerenciar a coleta e o armazenamento dos dados provenientes do chão de fábrica. O gerenciamento da segurança da informação incluiu uma hierarquia com níveis de permissões. O acesso ao sistema MES pelo operador é limitado ao acompanhamento dos

estágios da produção, sem possibilidade de mudanças nas variáveis do produto (AM01). A organização desenvolveu o *software* receptor dos dados (por meio de *wireless*) em parceria com um fornecedor de soluções em metrologia. (AE03).

Embora os entrevistados tenham citado informações pertinentes à análise de dados, tais como aplicação de linguagem *C Sharp*, *R* e *Python*, não foi evidenciada de maneira uniforme na Empresa B a implementação de práticas de *Data Science*, incluindo *machine learning* e *analytics*. A ausência de padronização neste aspecto pode ser evidenciada pela declaração de um entrevistado, conforme apresentado a seguir.

Em termos de *analytics* eu pessoalmente uso o *Python*. Eu sei que o pessoal usa o *R*, já vi outros usando o *Python* também, mas não tem uma padronização nesse sentido, ainda não temos um *software* para *analytics* (DT01).

A investigação dos **requisitos de automação** revelou que os componentes mais citados a respeito da arquitetura de automação abrangem as tecnologias RFID, *wireless*, *bluetooth*, assim como o uso de CLPs, sensores e atuadores. Conforme mostrado no Quadro 9, 50% dos entrevistados percebem o nível de automação da planta como “Otimização” (nível IV), enquanto nenhuma resposta foi atribuída aos níveis I (conexão) e V (autonomia).

Quadro 9 - Nível de automação na Empresa B

Nível I	Nível II	Nível III	Nível IV	Nível V
Conexão: somente uso de sensores, controladores e dispositivos para coletar dados do mundo físico e monitorar o status de máquinas e processos.	Controle: os dados coletados do mundo físico são convertidos em informações úteis para controlar o processo de forma autônoma.	Rede: os dados coletados do mundo físico abrangem todas as máquinas e são centralizados em uma rede para comparar o desempenho dessas máquinas e usar o histórico de dados para prever problemas futuros.	<b>Otimização: Algoritmos e IA são usados para gerar conhecimento sobre o processo e estabelecer relações de causa e efeito e fornecer recomendações para tomada de decisão e falhas potenciais.</b>	Autonomia: o sistema tem autonomia e capacidade de auto-configuração para evitar falhas e defeitos. O conhecimento sobre o processo está disponível em tempo real.
Frequência das Respostas (%)				
0,00	25,00	25,00	50,00	0,00

Fonte: Dados da Empresa B

Para assegurar a captura e transmissão dos dados do chão de fábrica foi necessário disponibilizar todas as estruturas de memórias de CLP em um servidor local. Deste modo, um *software* trabalha com um “embarramento” que serve como *gateway* para capturar as memórias do CLP e disponibiliza os dados em recursos de *hardware* (AQ02; AP02). É importante destacar que para alguns casos, a comunicação por cabeamento é necessária, visto que o processo de fabricação possui etapas que consomem demasiada energia elétrica (plasma e solda), podendo causar interferência nas tecnologias de comunicação sem fio (AQ01).

A análise dos **requisitos de competências** revelou pouca assertividade entre os entrevistados quanto às ações para o desenvolvimento das competências 4.0 e conhecimentos necessários para a implementação dos PCs. Contudo, destaca-se neste contexto, as ações de capacitação *online* e a contratação de profissionais na área de TI, assim como os conhecimentos em linguagem de programação, estatística e análise de dados, arquitetura de redes, engenharia de *software* e entendimento sobre o negócio da organização. A necessidade de uma cultura voltada à digitalização dos processos também foi citada por dois entrevistados. A declaração abaixo confirma essa necessidade sob o ponto de vista do entrevistado.

Primeiramente é necessário ter o *mindset* aberto, estar disposto a aprender coisas novas, não ficar limitado a tecnologias antigas, porque tem muita gente (ainda mais no setor fabril), que tem uma mente, em teoria, muito fechada, porque "funcionou sempre assim", então tem esse ponto (AE03).

As ações para o desenvolvimento das competências 4.0 envolveram não somente treinamento interno, mas também a participação em *workshops*, congressos e feiras internacionais. Tais eventos representam uma excelente oportunidade para o esclarecimento de dúvidas a respeito do uso de novas tecnologias e equipamentos (DT01). A estratégia de recursos humanos na empresa incluiu a alocação de pessoas com competências em engenharia de *software*, ciência da computação, banco de dados e comunicação M2M diretamente nas operações da fábrica (AQ02). Conforme declaração abaixo, foi observado que o pessoal de TI atua como apoio na implementação dos projetos de digitalização e que esse envolvimento é fundamental para o sucesso dos projetos.

Precisei de muita capacitação em TI, mas quando o pessoal de TI se agregou em nosso time em 2015, aí virou uma revolução. Se esse pessoal não tivesse vindo para a área de processo e ajudado nos projetos, nós não teríamos evoluído (GP02).

O desenvolvimento de competências para o pessoal de TI é *ad hoc*, estabelecido de acordo com os projetos de digitalização da fábrica. O investimento para as ações de capacitação é definido com base em um percentual do orçamento aprovado para o projeto (AM01). A interação IHM é desenvolvida por profissionais da área de TI, juntamente com o pessoal da engenharia de processos. Os treinamentos são multiplicados para todos os colaboradores que atuarão no processo (AM01). Conforme citado anteriormente, o conhecimento sobre as especificidades do negócio é uma importante competência para a estratégia de digitalização dos processos. Também foi observada a necessidade de conhecimentos em excelência operacional para as ações de implementação das tecnologias digitais.

Por fim, os **resultados** decorrentes da implementação dos PCs investigados na Empresa B mostram-se coerentes com a literatura sobre LSS, visto que eles estão alinhados tanto com os resultados decorrentes da implementação de projetos LSS, como os resultados gerados por meio de ações *kaizen*. Neste contexto, destacam-se os seguintes resultados: qualidade, competitividade, redução de custos, eliminação de desperdícios e informação em tempo real. A declaração a seguir é um exemplo de alinhamento entre resultados operacionais e resultados estratégicos decorrentes da integração entre práticas LSS e tecnologias I4.0:

Eu diria que migrar para a indústria 4.0 é essencial.., primeiro para que a empresa se mantenha competitiva em termos de custo e eliminação de desperdícios e, segundo, para ter uma vantagem estratégica, que na indústria automotiva significa ter produtos mais complexos que exigem tempo de desenvolvimento menor e produtos cada vez mais customizados (AQ02).

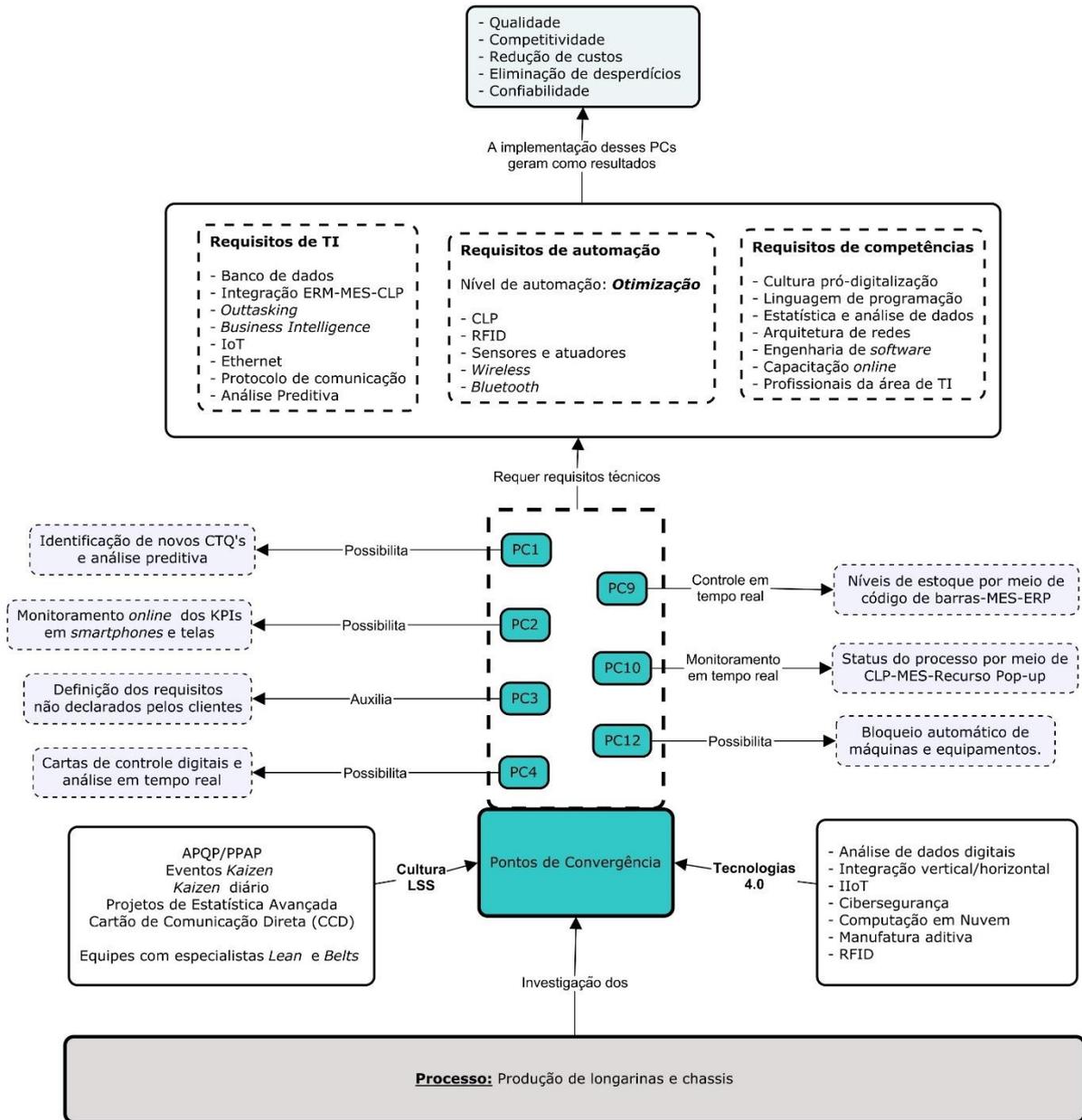
O Quadro 10 mostra a frequência de ocorrência dos elementos citados pelos entrevistados na Empresa B. A síntese dessas informações está representada por meio de um mapa conceitual (Figura 13) de modo a destacar os principais elementos inerentes a estrutura de análise da pesquisa (que foram citados por mais de um entrevistado), as proposições e a relação significativa entre eles.

Quadro 10 - Categorias e componentes estruturais na Empresa B

Categorias	Frequência observada	Componentes das categorias da estrutura de análise da pesquisa	Entrevistados que citaram
PC1	1 1	FMEA Análise preditiva	DT01 DT01
PC2	2 2 2 1	<i>Business intelligence</i> Sistema <i>pup-up</i> OEE Sistema MES	DT01; GP02 DM01; AQ02 AQ02; GP02 GP02
PC3	1 1	Estatística Inferencial Análise de <i>Cluster</i>	DT01 DT01
PC4	2 2 1 1 1	Controle em tempo real Análise preditiva <i>Out-tasking</i> Análise do Sistema de Medição Inteligência artificial	AE03; AM01 AE03; AM01 AM01 AE03 AE03
PC9	1 1	Sistema MES <i>Out-tasking</i>	AQ01 AQ01
PC10	1 1	<i>Andon</i> OEE em tempo real	AQ02 AQ02
PC12	2 2 1 1 1	Sistema de Visão Ação de bloqueio automática <i>Machine learning</i> Sistema MES RFID	AM01; DM01 AE03; DM01 AE03 AM01 AQ02
Requisitos de TI	6 6 4 3 3 3 3 2 1 1 1 1 1 1	Integração ERP-MES-CPL Banco de dados <i>Outtasking</i> Protocolo de comunicação <i>Business Intelligence</i> <i>Ethernet</i> IoT Análise preditiva Computação em nuvem Controle de acesso Linguagem Python <i>Machine learning</i> Engenharia de <i>software</i>	AE03; AM01; DM01; AQ01; DT01; GP02 AQ01; DT01; AQ02; DM01; AQ02; DT01 AE03; AQ01; DM01; GP02 DT01; DM01; AQ02 DT01; AQ02; GP02 AQ01; DT01; AM01 AM01; DM01; GP02 DT01; AM01 GP02 AM01 DT01 DT01 AQ01
Requisitos de automação	6 4 3 3 2 1 1 1	CLP RFID <i>Wireless</i> Sensores e atuadores <i>Bluetooth</i> Código de Barras M2M SCADA	AQ01; AM01; DM01; AQ02; GP02; AP02 AQ01; DT01; AQ02; GP02 AE03; AQ01; GP02 AE03; DM01; GP02 AQ01; DM01 AQ01 AM01 AQ02
Requisitos de competência	3 3 3 2 2 2 2 1 1 1 1 1	Engenharia de <i>software</i> Domínio de estatística e análise de dados Capacitação <i>online</i> Conhecimento em arquitetura de redes Cultura pró-digitalização Linguagem de programação Conhecimento sobre o negócio Contratação de profissionais da área de TI Conhecimento em sistema MES Treinamento interno Treinamento externo Operações com banco de dados Participação em eventos sobre tecnologia	AQ01; AQ02; AP02 AE03; AQ02; AP02 AM01; AQ02; GP02 AE03; AQ02; AP02 AE03; AQ01 AE03; AQ02 AE03; DM01 AQ01; GP02 DM01 AM01 DM01 AQ02 DT01
Resultados	4 4 3 3 3 2 1 1	Competitividade Qualidade Eliminação de desperdícios Informação em tempo real Redução custos Confiabilidade Produtividade Flexibilidade	AE03; AQ01; AQ02; AP02 AQ01; DT01; AM01; DM01 AE03; AQ02; GP02 AE03; AM01; DM01 AQ01; AQ02; GP02 AM01; AQ02 AE03 AQ02

Fonte: Dados da Empresa B

Figura 13 - Mapa conceitual da Empresa B



Fonte: Dados da Empresa B

#### 4.4 ANÁLISE INTERCASOS

Conforme apresentado na seção 3, a análise intercasos busca promover uma análise cruzada dos resultados obtidos individualmente nas duas empresas para facilitar a comparação das evidências de pesquisa. Desta forma, as menções de todos os entrevistados foram agrupadas de modo a permitir uma visão conjunta dos resultados e *insights* a respeito da aderência da estrutura de análise da pesquisa com base nas evidências obtidas. O Quadro 11 mostra o número de citações observada nas duas amostras (Empresa A e Empresa B) em relação aos componentes presentes nas categorias da estrutura de análise da pesquisa, assim como a soma dessas frequências.

Foram identificados 42 componentes diretamente relacionados aos 10 PCs priorizados na pesquisa, sendo que os PCs “*Uso de Data Science para a redução de tempos de setup*” (PC8), “*Controle da qualidade com o auxílio de robótica avançada*” (PC11), e “*Uso de realidade aumentada para otimizar atividades operacionais*” (PC13), não foram investigados em profundidade por não apresentarem IRF acima de 50%. Destacam-se neste contexto, por frequência observada, os componentes: “RFID” (5 menções); bem como “OEE”, “AGVs/AIVs”, “*WiFi button*” e “*Andon digital*” (ambos com 4 menções). Com relação aos requisitos de TI, automação e competências, sobressaem-se os requisitos com mais de 5 menções: “*integração de sistemas*” (11 menções); “RFID” (10 menções); “*protocolos de comunicação*” e “*workshops e treinamentos on-the-job*” (ambos com 8 menções); “*Analítica ou Data Science*” (7 menções), e finalmente “*WiFi/IoT*”, “*sensores e atuadores*”, “*CLPs*”, “*banco de dados*” e “*conscientização sobre o propósito da I4.0*” (todos com 6 menções).

No âmbito da categoria “resultados” despontam-se os seguintes componentes: “*Eficiência e Produtividade*” (11 menções); “*competitividade*” (9 menções); “*redução de custos*” (8 menções); assim como “*informação em tempo real*”, “*qualidade*” e “*redução de desperdícios*” (ambos com 7 menções). Conforme destacado anteriormente nas análises intracasos, tais resultados estão totalmente alinhados com os objetivos relacionados à abordagem LSS (qualidade, custo e velocidade) observados no referencial teórico.

Para facilitar a visualização dos componentes mais citados nas entrevistas, bem como proporcionar uma visão sobre as relações entre eles, uma rede (grafo) foi construída por meio do *software* Gephi 0.9.2, versão 3. A Figura 14 ilustra a rede de associações contendo 75 nós (componentes) e 283 arestas (relações). A disposição e a dimensão desses nós foi definida pelo algoritmo Yifan Hu e grau de saída, que remete as frequências registradas em cada componente às categorias da estrutura de análise da pesquisa.

Quadro 11 - Categorias e componentes da estrutura de análise de pesquisa (Intercasos)

<b>Categorias</b>	<b>Componentes das categorias da estrutura de análise da pesquisa</b>	<b>Número de citações na Empresa A</b>	<b>Número de citações na Empresa B</b>	<b>Total</b>
<b>PC1</b>	<i>Big Data Analytics</i>	2	1	3
	Simulação	2	-	2
	Identificação de gargalos	2	-	2
	RFID	2	-	2
	FMEA	-	1	1
<b>PC2</b>	OEE	2	2	4
	KPI automático	3	-	3
	<i>Business Intelligence</i>	1	2	3
	Sistema MES	-	1	1
	Sistema <i>pup-up</i>	-	1	1
<b>PC3</b>	Estatística Inferencial	-	1	1
	Análise de <i>Cluster</i>	-	1	1
<b>PC4</b>	Controle em tempo real/Alerta automático	1	2	3
	Banco de dados	1	-	1
	<i>Out-tasking</i>	-	1	1
	Análise do Sistema de Medição	-	1	1
	Inteligência Artificial	-	1	1
<b>PC5</b>	Análise preditiva	2	-	2
	<i>Big Data Analytics</i>	2	-	2
	Manutenção Preventiva	1	-	1
<b>PC6</b>	AGVs/AIVs	4	-	4
	Esteira transportadora automática	1	-	1
<b>PC7</b>	COBOT	2	-	2
	Programação intuitiva	2	-	2
<b>PC9</b>	Chamada <i>online (WiFi button)</i>	4	-	4
	Sensores e cortina de luz ( <i>pick by light</i> )	2	-	2
	Sistema MES	-	1	1
	<i>Out-tasking</i>	-	1	1
<b>PC10</b>	<i>Andon</i> digital	3	1	4
	AGVs e AIVs	3	-	3
	<i>Smartphone</i> e telas <i>touch</i>	2	-	2
	RFID e IIoT	2	-	1
	OEE	-	1	1
<b>PC12</b>	RFID	4	1	5
	AGV	3	-	3
	Sistema de visão	1	2	3
	IHM	2	-	2
	Inteligência artificial	1	-	1
	Sistema <i>aircheck</i>	1	-	1
	<i>Machine Learning</i>	-	1	1
	Sistema MES	-	1	1
	Ação de bloqueio automática	-	1	1
<b>Requisitos de TI</b>	Integração de sistemas	5	6	11
	<i>WiFi / IoT</i>	3	3	6
	Banco de dados	-	6	6
	Cabeamento / <i>Ethernet</i>	2	3	5
	<i>Outsourcing/outtasking</i>	2	1	3
	<i>Handheld</i> e monitores <i>touch</i>	3	-	3
	<i>Bluetooth</i>	1	2	3
	Computação em nuvem	2	1	3
	Linguagem de programação	-	2	2
	Sistemas operacionais	2	-	2
	<i>Machine Learning</i>	1	1	2
	Engenharia de software	-	1	1
	Controle de acesso	-	1	1
<b>Requisitos de automação</b>	RFID	6	4	10
	Protocolos de comunicação	5	3	8
	Sensores e atuadores	3	3	6
	CLPs	-	6	6
	AGVs e AIVs	5	-	5
	IHM	2	-	2
	Comunicação M2M	-	1	1

Continua...

Continuação

<b>Categorias</b>	<b>Componentes das categorias da estrutura de análise da pesquisa</b>	<b>Número de citações na Empresa A</b>	<b>Número de citações na Empresa B</b>	<b>Total</b>
<b>Requisitos de automação</b>	Sistema SCADA	-	1	1
	Contrato "Turn Key"	1	-	1
	Código de barras	-	1	1
<b>Requisitos de competências</b>	workshops e treinamento <i>on-the-job</i>	5	3	8
	Analítica ou <i>Data Science</i>	3	4	7
	Conscientização sobre o propósito da I4.0	4	2	6
	Aprendizado por meio de <i>proof of concept</i>	5	-	5
	Linguagem de programação	2	2	4
	Envolvimento em projetos ( <i>learn by doing</i> )	4	-	4
	Contratação de profissionais da área de TI	2	2	4
	Conhecimento em arquitetura de redes	-	3	3
	Capacitação <i>online</i>	-	3	3
	Parceria com instituições de ensino	3	-	3
	Conhecimento sobre o negócio	-	2	2
	Metodologias ágeis	2	-	2
	Ergonomia / exoesqueleto	2	-	2
Conhecimento em sistemas MES	-	1	1	
<b>Resultados</b>	Eficiência / produtividade	10	1	11
	Competitividade	5	4	9
	Redução de custos	5	3	8
	Informação em tempo real	4	3	7
	Redução de desperdícios	4	3	7
	Qualidade	3	4	7
	Padronização e gestão <i>paperless</i>	3	-	3
	Confiabilidade	-	2	2
	Gerenciamento de gargalos	2	-	2
	Segurança	2	-	2
	Flexibilidade	-	1	1
Velocidade	1	-	1	

Fonte: Dados da pesquisa

Os 75 nós presentes na rede ilustrada na Figura 14 estão destacados por diferentes cores, de acordo com suas categorias. Os nós atribuídos aos 10 PCs evidenciados (destacados na cor vermelha) possuem menor peso devido critério de configuração adotado (grau de saída). Notam-se quatro agrupamentos em torno das demais categorias da estrutura de análise da pesquisa, que estão destacados na cor azul para os requisitos de TI, violeta para os requisitos de automação, amarelo para os requisitos de competência e verde para os resultados. A espessura das arestas que conectam esses componentes evidencia a intensidade de relacionamento entre os nós, de acordo com o número de ocorrências.

Destacam-se nessa análise, a intensidade na associação componentes-categorias: *integração de sistemas – requisitos de TI*; RFID – requisitos de automação; *workshop/on-the-job training* e *Data Science – requisitos de competências*; e *eficiência/produtividade* e *competitividade – resultados*. Quanto ao grau de interação entre os diversos componentes, destacam-se: *Data Science*, *linguagem de programação*, *Sistema MES*, *OEE*, *RFID*, *sensores/atuadores*, *machine learning*, *handheld/telas touch*, *inteligência artificial*, *banco de dados*, *outsourcing/out-tasking*, *real-time* e *gargalos*.



Com o propósito de comprovar se existem diferenças significativas entre as percepções evidenciadas nas duas empresas, um teste de hipótese não paramétrico foi aplicado na análise intercasos. A escolha pelo tipo de teste considerou a natureza dos dados obtidos (dados discretos em escala ordinal), o tamanho das amostras coletadas e o objetivo do teste. O teste de Mann-Whitney pode ser empregado para comprovar se dois grupos independentes foram ou não extraídos da mesma população ou para uma predição de diferença entre as duas amostras pequenas com mensuração em escala ordinal, sendo que em uma prova bilateral  $p(a>b) \neq \frac{1}{2}$  (SIEGEL, 1975). A formulação dos pares de hipóteses foi estabelecida da seguinte forma:

$H_0$ : Não há diferença entre as medianas obtidas sobre a percepção do “PCx” entre as empresas A e B.

$H_1$ : As medianas obtidas sobre a percepção do “PCx” é diferente entre as empresas A e B.

Para proceder o teste, as respostas obtidas para cada um dos 13 PCs, em cada uma das empresas, foi inserida em colunas independentes em uma planilha no *software* Minitab (versão 17), onde a operação foi processada seguindo as etapas: *Stat/Nonparametrics/Mann-Whitney*. O nível de significância para o teste foi de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). A Tabela 5 mostra os resultados das provas aplicadas para as respostas obtidas em cada um dos 13 PCs. A segunda e terceira coluna mostram as medianas obtidas em cada amostra. A coluna “Estatística W” mostra a estatística de Mann-Whitney que é obtida a partir da expressão 2:

$$W = (\text{número de diferenças positivas}) + 0,5 (\text{número de diferenças iguais a } 0) + 0,5 (n_1(n_1+1)) \quad (2)$$

Onde  $n_1$  é igual ao número de observações na primeira amostra. Essa estatística é utilizada para o cálculo do valor de  $p$ , com base em uma aproximação da distribuição normal usando a média e a variância de  $W$ , conforme expressão 2.0:

$$Z = (|W - \text{média de } W| - 0,5) / \text{raiz quadrada da variância de } W \quad (3)$$

Como  $H_1$  prediz “diferença”, a prova é bilateral e consiste em todos os valores de  $p$  (P-Valor) tão pequenos onde a probabilidade associada à sua ocorrência, sob  $H_0$ , não seja superior a  $\alpha = 0,05$ . Contudo, quando ocorrem valores empatados entre as observações (como é o caso dos dados observados nesta pesquisa), o teste executado no Minitab atribui a cada uma das observações empatadas a média das classificações que seriam atribuídas aos postos caso não houvesse empate. Desta forma, a coluna “*P-valor Ajustado*” oferece um valor de  $p$  mais preciso do que o valor não ajustado. Por fim, a coluna “*Decisão sobre  $H_0$* ” mostra a decisão tomada sobre a hipótese nula, sendo que  $H_0$  é rejeitada quando  $P\text{-valor} \leq \alpha$ .

Tabela 5 – Resultados do Teste de Mann-Whitney

Pontos de Contato (PCs)	Mediana Empresa A	Mediana Empresa B	Estatística W	P-Valor	P-valor Ajustado	Decisão sobre H <sub>0</sub>
<b>PC1. Mapeamento de processos auxiliado por CPS, Big Data e Simulação.</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>156,0</b>	<b>0,7587</b>	<b>0,7441</b>	<b>Não rejeitar</b>
<b>PC2. Medição de desempenho por meio de CPS e Big Data Analytics.</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>150,0</b>	<b>0,4736</b>	<b>0,4084</b>	<b>Não rejeitar</b>
PC3. QFD auxiliado por Big Data Analytics.	3,00	4,00	134,0	0,0705	0,0509	Rejeitar
PC4. Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS e Big Data Analytics	4,00	5,00	129,5	0,0344	0,0238	Rejeitar
<b>PC5. Monitoramento de máquinas por meio de CPS e Big Data Analytics.</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>165,0</b>	<b>0,8112</b>	<b>0,8038</b>	<b>Não rejeitar</b>
PC6. Logística interna auxiliada por CPS e AGV	4,00	1,00	205,5	0,0027	0,0018	Rejeitar
PC7. Projeto de células de manufatura com auxílio de robótica avançada e CPS.	4,00	1,00	199,0	0,0105	0,0084	Rejeitar
<b>PC8. Uso de Data Science para a redução de tempos de setup.</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>168,5</b>	<b>0,6328</b>	<b>0,6000</b>	<b>Não rejeitar</b>
<b>PC9. Digitalização do controle de estoques (e-kanban).</b>	<b>5,00</b>	<b>4,50</b>	<b>187,5</b>	<b>0,0760</b>	<b>0,0623</b>	<b>Não rejeitar</b>
<b>PC10. Monitoramento e controle da produção em tempo real.</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>172,5</b>	<b>0,4528</b>	<b>0,4118</b>	<b>Não rejeitar</b>
<b>PC11. Controle da qualidade com o auxílio de robótica avançada.</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>185,0</b>	<b>0,1087</b>	<b>0,1008</b>	<b>Não rejeitar</b>
<b>PC12. Mistake proofing com o auxílio de CPS ou inteligência artificial.</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>157,5</b>	<b>0,8378</b>	<b>0,8271</b>	<b>Não rejeitar</b>
<b>PC13. Uso de realidade aumentada para auxiliar atividades operacionais.</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>186,0</b>	<b>0,0945</b>	<b>0,0714</b>	<b>Não rejeitar</b>

Fonte: Dados da pesquisa

Dentre os treze testes realizados para a comprovação das hipóteses de nulidade envolvendo a percepção dos entrevistados sobre os 13 PCs, quatro apresentaram rejeição da H<sub>0</sub>. Considerando que o valor de *p* ajustado para o **PC3 – QFD auxiliado por Big Data Analytics** foi de 0,0509 ( $\leq 0,05$ ), comprovou-se a hipótese de que a mediana da Empresa A é significativamente diferente da Empresa B. Tal diferença pode ser compreendida pelo fato de que os entrevistados na Empresa A se mostraram neutros quanto a implementação deste PC (71,43% escolheram a escala 3), resultando em um IRF abaixo de 50% e, portanto, sendo desconsiderado como um ponto relevante na organização, enquanto na Empresa B, o IRF alcançou 75%.

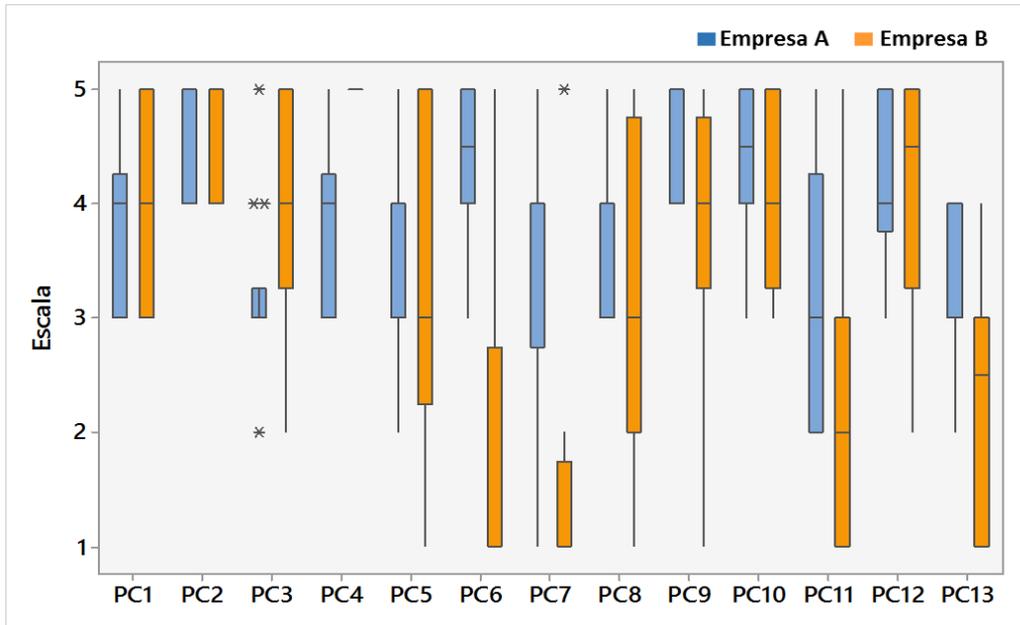
A decisão de rejeição da  $H_0$  para o **PC4 – Estudo de Capabilidade e CEP auxiliado por CPS e Big Data Analytics** (P-Valor Ajustado = 0,0238) pode ser explicada pela diferença das percepções entre os dois grupos quanto a escala 5 (concordo totalmente). Enquanto na Empresa A 21,43% dos entrevistados concordaram com essa escala de avaliação, na Empresa B esse percentual foi igual a 87,50%. Além disso, essa forte concordância a respeito da implementação de estudos de capabilidade e CEP auxiliados por CPS pode ser compreendida pelo fato de que esse projeto foi pioneiro na estratégia de conversão para a I4.0 na Empresa B, envolvendo grande parte dos colaboradores e parceiros em automação industrial.

O terceiro teste em que a  $H_0$  foi rejeitada se refere ao **PC6 - Logística interna auxiliada por tecnologias 4.0** (P-Valor Ajustado = 0,0018). Enquanto na Empresa A o IFR para esse PC6 foi igual a 85,71%, na Empresa B esse indicador alcançou apenas 12,50% dos entrevistados. A explicação para a diferença de percepção neste PC nas duas amostras está associada ao estágio de evolução da implementação dos AGVs/AIVs na Empresa A, visto que essa tecnologia já faz parte da rotina no chão de fábrica, onde é possível observar dezenas desses dispositivos em operação.

Finalmente, o projeto de **Células de manufatura com auxílio de robótica e CPS - PC7**, representa o último teste no qual a hipótese de nulidade foi rejeitada (P-Valor Ajustado = 0,0084). A razão para esse resultado por ser atribuída ao fato de que na Empresa A o pilar “Robótica Colaborativa” encontra-se em fase de desenvolvimento, com algumas aplicações testadas e disseminadas no chão de fábrica, assim como a existência de diversos tipos de robôs na linha de montagem. Por outro lado, a implementação de COBOTs e robótica autônoma na Empresa B ainda se encontra em fase de ideação.

Diferentemente dos testes paramétricos, onde as provas podem basear-se na hipótese de que os dados amostrais representem certos “parâmetros” de uma população, tais como média e variância, os testes de hipóteses não paramétricos se referem à ordem, ou posto dos dados, podendo referir-se à diferença entre medianas a partir de um “*continuum*” dos valores observados (SIEGEL, 1975). Para facilitar a visualização desse *continuum* nos 13 PCs investigados foi elaborado um gráfico BoxPlot múltiplo. A Figura 15 mostra a amplitude e os intervalos interquartis referente as percepções dos entrevistados nas duas empresas. Nota-se as diferenças entre as percepções sobre os PCs cuja hipótese de nulidade foi rejeitada, assim como a presença de valores extremos ou “*outliers*” nos PCs 3 e 7.

Figura 15 - Gráfico BoxPlot para os valores observados nos 13 PCs



Fonte: Dados da pesquisa

Para ampliar a consistência da análise intercasos, procedeu-se uma análise multivariada por meio da técnica de Análise de Componentes Principais (ACP), cujo propósito é resumir os principais aspectos da variação nas variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , a partir de combinações lineares dessas variáveis (MANLY, 2008). Embora alguns autores contestem a aplicação da ACP para variáveis ordinais, a literatura tem demonstrado aplicações desta natureza (LATTIN *et al.*, 2011; QUEIROZ *et al.*, 2015; KULKARNI *et al.*, 2019).

A análise foi processada no *software* Statistica, versão 7. Para tanto, foram estabelecidas quatro variáveis associadas aos PCs: (V<sub>1</sub>) IRF Empresa A; (V<sub>2</sub>) IRF Empresa B; (V<sub>3</sub>) Peso ou frequência de menções pertinentes à cada PC, que também foi utilizada como medida de peso na construção da rede ilustrada na Figura 15; (V<sub>4</sub>) Proporção Arestas, que é o número de arestas pertinentes ao PC dividido pelo total de arestas na rede; e (V<sub>5</sub>) Proporção Nós, que é o número de componentes conectados ao PC e o total de nós observados na rede.

Após a padronização das variáveis selecionadas, com média zero e variância unitária, procedeu-se a ACP por meio da verificação dos *autovalores*, que indicam o total da variância de cada componente principal (CP). Tais valores são apresentados no Apêndice C. A Tabela 6 mostra a carga fatorial para cada CP e destaca a relevância do CP01 com base nos critérios de retenção propostos por Lattin *et al.*, (2011), que consideram a proporção da variância explicada >50% e autovalor >1 (regra de Kaiser).

Tabela 6 - Autovalores e proporção da variância dos Componentes Principais

<b>Componente Principal</b>	<b>Proporção da variância total explicada</b>	<b>Proporção acumulada da variância total explicada</b>	<b>Autovalor</b>
<b>CP01</b>	<b>72,9456</b>	<b>72,9456</b>	<b>3,6472</b>
CP02	19,3768	92,3224	0,9688
CP03	7,4098	99,7322	0,3704
CP04	0,2678	100,0000	0,0133

Fonte: Dados da pesquisa

Observa-se que o CP1 capta aproximadamente 73% da variância contida nas variáveis selecionadas e sua análise revela-se útil para a compreensão da aderência dos diferentes PCs nas empresas analisadas. A Tabela 7 ilustra a contribuição de cada um dos PCs (valores percentuais) para a formação dos componentes principais com base nas correlações. Assim, percebe-se que a variância inerente ao CP1 é influenciada principalmente por cinco PCs: PC12 (26,14%); PC8 (13,36%); PC2 (12,49%); PC13 (11,95%); e PC11 (11,84%).

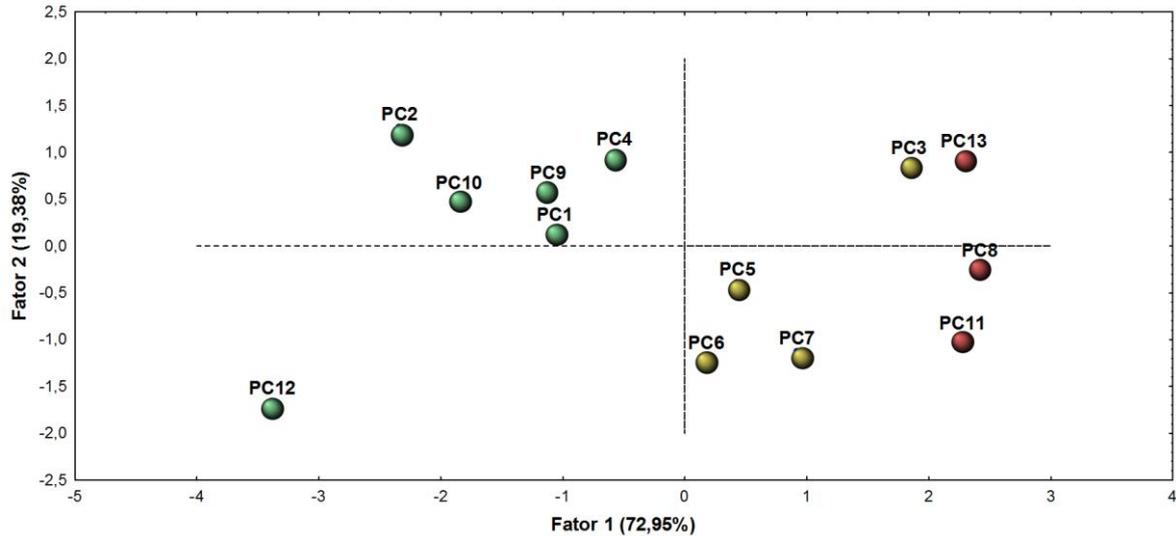
Tabela 7 - Contribuição dos PCs para a formação dos Componentes Principais

<b>PCs</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>
<b>PC1</b>	2,6024	0,3239	5,4935	2,3970
<b>PC2</b>	12,4880	13,7592	2,8752	4,8034
<b>PC3</b>	7,7002	6,9908	15,0413	3,7262
<b>PC4</b>	0,7656	8,6000	1,4639	81,4728
<b>PC5</b>	0,4255	1,3161	1,1685	0,0587
<b>PC6</b>	0,0697	11,8638	20,9938	0,8547
<b>PC7</b>	1,9242	10,8767	0,6059	0,1744
<b>PC8</b>	13,3645	0,3010	1,4890	0,2351
<b>PC9</b>	2,8732	3,5418	19,9578	1,0454
<b>PC10</b>	7,8555	2,4275	1,9183	2,0393
<b>PC11</b>	11,8395	8,0487	1,3571	0,3035
<b>PC12</b>	26,1380	23,7857	25,5362	0,1812
<b>PC13</b>	11,9530	8,1643	2,0987	2,7078

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 16 mostra a representação dos 13 PCs para os dois primeiros componentes principais, que explicam 92,32% da variação nos dados. Nota-se que, quanto mais distante o PC estiver do eixo no Fator 1, maior será a intensidade de correlação. Neste contexto, destacam-se as correlações negativas do PC12 (-3,3823) e PC2 (-2,3379), assim como as correlações positivas para PC8 (2,4186), PC13 (2,2873) e PC11 (2,2763). Quanto mais negativa for a pontuação de um PC neste fator, maior será a evidência de sua implementação. O motivo dessa inversão pode ser explicado pelo fato de que alguns programas computacionais geram os componentes com os sinais dos coeficientes originais trocados (MANLY, 2008).

Figura 16 - Gráfico dos escores dos dois primeiros componentes principais



Fonte: Dados da pesquisa

Diante dessas considerações, a distribuição dos 13 PCs segundo os dois primeiros componentes principais permitiu uma classificação desses PCs quanto as evidências de sua implementação nas duas empresas. Tal classificação pode ser descrita da seguinte forma:

- PCs aderentes.** Todos os PCs com valores negativos no Fator 1 (PC1; PC2; PC4; PC9; PC10; e PC12), destacados na cor verde possuem IRF acima de 50% em ambas as empresas analisadas. Com exceção para o PC4, que apresentou valor de  $p$  igual a 0,0238 ( $H_0$  rejeitada), todos os outros PCs neste grupo tiveram a hipótese de nulidade não rejeitada com um nível de significância de 5%. Contudo, a  $H_0$  não seria rejeitada para o PC4 considerando um  $\alpha$  de 1%.
- PCs parcialmente aderentes.** Dentre os quatro PCs pertinentes a esta categoria, destacados no gráfico na cor amarela (PC3, PC5, PC6 e PC7), três tiveram  $H_0$  rejeitada (PC3, PC6 e PC7). Contudo, embora a hipótese de nulidade para o PC5 não tenha sido rejeitada, observa-se uma maior dispersão nas frequências obtidas na Empresa B para este PC (vide Figura 15), que resultou em um IRF abaixo de 50%.
- PCs não aderentes.** Abrange os PCs com IRF abaixo de 50% (PC8, PC11 e PC13) destacados na cor vermelha. Não há evidência de diferenças nas medianas observadas para esses PCs, visto que a hipótese de nulidade estabelecidas para eles não foi rejeitada. Isso ressalta a percepção dos entrevistados sobre a não aderência desses PCs nas duas empresas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta última seção são apresentadas as considerações finais a respeito dos resultados obtidos frente aos objetivos propostos. As implicações teóricas e gerenciais, assim como as limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras serão detalhadas a seguir.

### 5.1 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS

Considerando que a análise dos pontos de convergência entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0 em processos de manufatura constituiu o objetivo geral desta tese, pode-se dizer que os resultados obtidos no estudo multicase foram capazes de fornecer uma visão empírica a respeito dessa integração, visto que a maior parte dos PCs extraídos da literatura foi evidenciada nas duas empresas. Além disso, esses resultados mostraram-se consistentes com a estrutura de análise de pesquisa, fornecendo respostas às questões formuladas, tais como os PCs mais aderentes ao processo investigado (o que), os requisitos técnicos necessários à implementação desses PCs (como) e os resultados decorrentes da integração (porque).

Assim, cabe ressaltar que o objetivo geral deste estudo emana de três questões fundamentais. As respostas à primeira questão de pesquisa “*Quais são os pontos de convergência entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0?*” foram obtidas *a priori* por meio de uma RSL que resultou na construção de uma estrutura de análise da pesquisa abrangendo 13 pontos de convergência, cuja implementação requer a adequação de requisitos de TI, automação industrial e competências, de modo a alcançar resultados específicos.

Todavia, conforme ilustrado no Quadro 4, a literatura se mostrou mais afluente em relação aos seguintes pontos: **PC1 – Mapeamento de processos auxiliado por CPS, Big Data e Simulação** (8 artigos); **PC5 - Monitoramento de máquinas por meio de CPS e Big Data Analytics** (8 artigos); **PC9 - Digitalização do controle de estoques “e-kanban”** (6 artigos); e **PC10 - Monitoramento e controle da produção em tempo real** (6 artigos). Esses quatro PCs também foram evidenciados de forma mais consistente nas duas empresas investigadas, conforme resultado da ACP para o *cluster* “PCs aderentes”. Por outro lado, o **PC12 - Mistake proofing com o auxílio de CPS ou inteligência artificial**, que apresentou maior evidência empírica, foi observado em 5 artigos da RLS.

Convém destacar que esses PCs oferecem uma nova concepção de gerenciamento do chão de fábrica (*digital shop floor management*), ao permitir a digitalização de atividades tradicionalmente executadas sem o uso de tecnologias avançadas e apoiadas por instruções e registros em papel, tais como elaboração de mapas de processos, monitoramento de máquinas usando listas de verificação, controle de estoque por cartão *kanban* e apontamento da produção. No âmbito da excelência operacional, tais atividades poderão ser influenciadas por meio da implementação de CPS.

A estrutura de análise de pesquisa norteou a condução do estudo multicase. Os procedimentos de coleta de dados nas duas organizações participantes incluíram entrevistas semiestruturadas por meio de questões fechadas (*mapping questions*) e abertas (*mining questions*), registros de observações *in loco* e análise de documentos internos. As entrevistas envolveram profissionais com proficiência na implementação de práticas LSS e experiência em projetos de transformação digital ligados ao tema I4.0 em diversos níveis organizacionais, tais como, gerentes de processo, diretor de operações, analistas, planejadores, desenvolvedores de sistemas e assistentes, conforme ilustrado nos Quadros 5 e 8.

Os resultados do estudo multicase revelaram que, além dos PCs com maior evidência de implementação nas duas empresas participantes (classificados como “aderentes” e “parcialmente aderentes”), as estratégias de digitalização exigiram dessas organizações um conjunto de requisitos técnicos, estruturados nesta pesquisa como: (a) requisitos de TI; (b) requisitos de automação; e (c) requisitos de competências, conforme mostrado na Figura 17. Os elementos presentes nesses requisitos “ajustam” a estrutura de análise da pesquisa frente as evidências registradas nas duas empresas. A observação desses requisitos forneceu respostas à segunda questão de pesquisa “*Como é possível implementar esses pontos de convergência em processos de manufatura?*”, por revelar informações a respeito de “como” os PCs foram implementados nessas organizações.

Com relação aos **requisitos de TI**, verifica-se que a integração de sistemas (como por exemplo, BI e MES) com outros dispositivos conectados ao chão de fábrica (CLP, RFID, sensores e atuadores) representa uma condição essencial para a implementação dos PCs. Também se destacam neste contexto, a necessidade de banco de dados e soluções em conectividade, incluindo *WiFi*, *ethernet* e *bluetooth*. Desta forma, percebe-se que dentre as tecnologias classificadas como “habilitadoras”, a integração vertical, juntamente com IoT, computação em nuvem e cibersegurança constituem a base da digitalização dos processos em termos de arquitetura de TI.

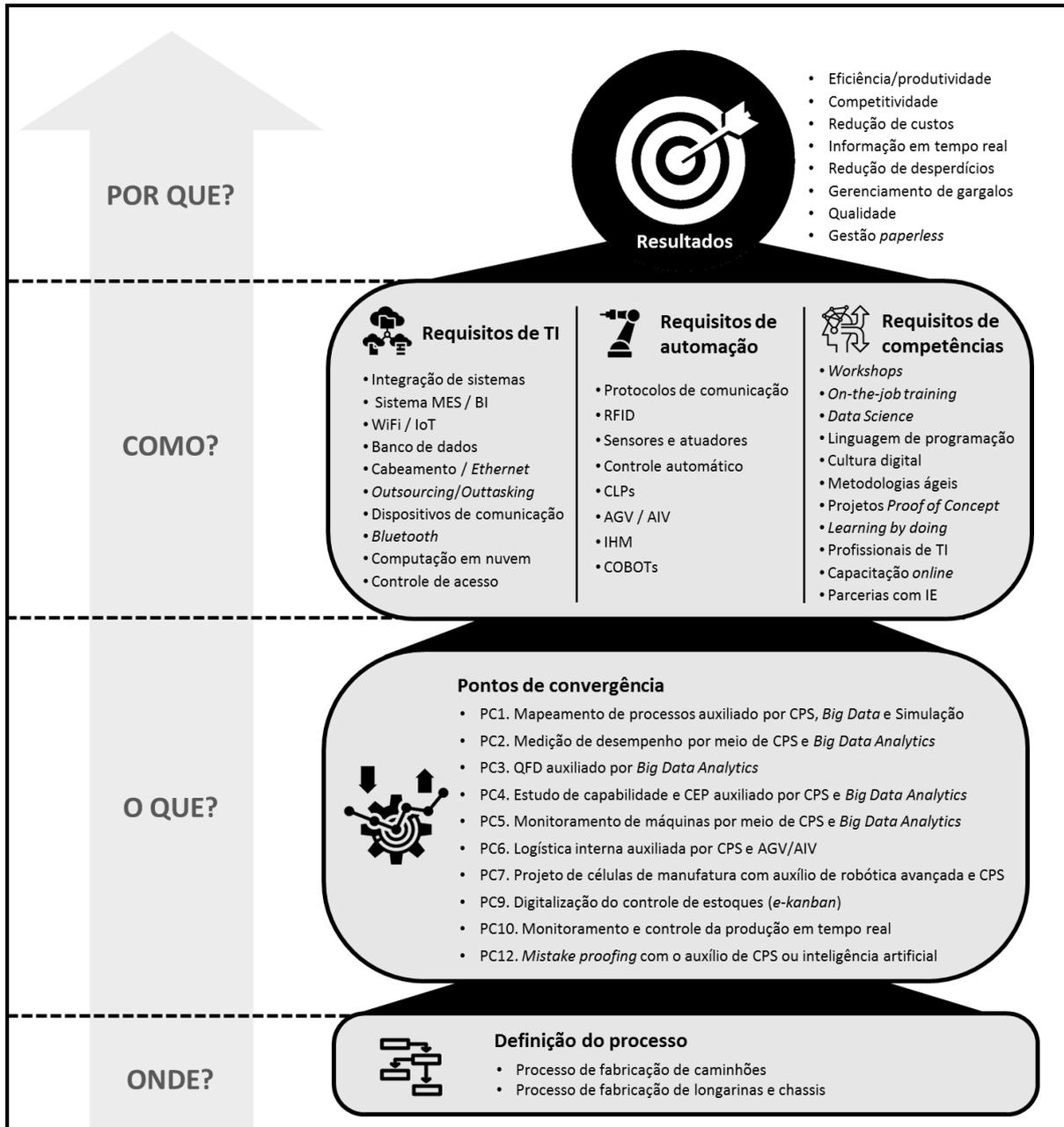
Os requisitos de automação mais citados pelos entrevistados também estão relacionados com a questão da conectividade entre os recursos produtivos, com destaque para as seguintes tecnologias: RFID, CLP, AGV/AIV, sensores e atuadores. É importante destacar que oito entrevistados mencionaram a importância de protocolos de comunicação neste tópico. Contudo, nenhum modelo de referência ou *framework* específico foi mencionado nas entrevistas. O referencial teórico deste estudo apresenta dois modelos de arquitetura de automação, com destaque para o *framework* “5C” (LEE, 2015; QIN *et al.*, 2016) e RAMI 4.0 (ADOLPHS *et al.*, 2015; KOLBERG *et al.*, 2017; MA *et al.*, 2017). Conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13, os mapas conceituais das empresas indicam a necessidade de níveis intermediários de automação, classificados como “redes” na Empresa A e “otimização” na Empresa B.

A observação dos onze requisitos de competências evidenciados nas duas empresas e mostrados na Figura 17 revela que tais componentes podem ser relacionados à três aspectos. O aspecto “conhecimentos e habilidades requeridas” abrange a necessidade de domínio em técnicas de *Data Science*, linguagem de programação e contratação de profissionais de TI para dar suporte aos projetos de digitalização. Por outro lado, o aspecto “cultura digital” reúne a prática de ações *learn by doing* e o desenvolvimento de uma cultura voltada à digitalização dos processos. Finalmente, o aspecto “ações para o desenvolvimento de competências” cobre os seguintes componentes: realização de workshops, treinamento interno (*on-the-job*), capacitação *on-line*, implementação de metodologias ágeis e PoCs, e parcerias com instituições de ensino voltadas para os temas relacionados à I4.0.

As respostas relacionadas com a terceira questão de pesquisa “*Quais são os resultados decorrentes dessa integração?*”, também se mostraram coerentes com a literatura, tanto em relação às práticas LSS, como em relação aos objetivos associados à estratégia de transformação digital. Enquanto o referencial teórico sobre as práticas de excelência operacional tem enfatizado resultados em termos de qualidade, custo e velocidade (SALAH *et al.*, 2010; DE MAST; MEHRJERDI 2011; PYSDEK; KELLER, 2011; LOKKERBOL, 2012; ISMYRLIS; MOSCHIDIS, 2013), o estado da arte sobre I4.0 tem ressaltado a disponibilidade de dados em tempo real (KAGERMANN *et al.*, 2013; ADOLPHS *et al.*, 2015; RÜßMANN *et al.*, 2015) e a flexibilidade da produção (RÜßMANN *et al.*, 2015; ELEFTHERIADIS; MYKLEBUST 2016).

A percepção sobre os resultados “eficiência e produtividade”, “competitividade”, “redução de custos”, “informação em tempo real”, “redução de desperdícios”, “gerenciamento de gargalos” e “qualidade” foi compartilhada por vários entrevistados. Assim, é possível dizer que tais resultados refletem os benefícios decorrentes da implementação dos PCs e podem direcionar as estratégias de transformação digital no âmbito da excelência operacional.

Figura 17 - Estrutura de análise final para o estudo multicaseos



Fonte: Dados da pesquisa

## 5.2 IMPLICAÇÕES TEÓRICAS

A estrutura de análise de pesquisa desenvolvida neste estudo serviu como um *framework* teórico para nortear a condução da pesquisa de campo e representou um instrumento útil para diagnosticar e compreender as questões teóricas formuladas. Conforme argumentado na seção introdutória, a literatura tem apresentado pesquisas que abordam os PCs de forma parcial, incluindo práticas LSS como Mapeamento do Fluxo de Valor (SOUTHARD *et al.*, 2012; YANG *et al.*, 2015; TAMÁS *et al.*, 2016; RANE *et al.*, 2017; LUGERT *et al.*, 2018; MAYR,

2018), *kanbans* eletrônicos (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017; WAGNER *et al.*, 2017; ANTE *et al.*, 2018; SATOGLU *et al.*, 2018), controle digital da produção (HEDELIND; JACKSON, 2011; SOUTHARD *et al.*, 2012; NICOLETTI, 2013; KOLBERG *et al.*, 2017; RANE *et al.*, 2017; MA *et al.*, 2017; ROMERO *et al.*, 2018; SATOGLU *et al.*, 2018), padronização de processos com o uso de realidade aumentada (SCHMITT *et al.*, 2013; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS *et al.*, 2017; POWELL *et al.*, 2018; SATOGLU *et al.*, 2018). Com relação as práticas SS, verifica-se trabalhos envolvendo QFD (LI *et al.*, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; LAUX *et al.*, 2017) e controle da qualidade (HOERL *et al.*, 2014; MAYR *et al.*, 2018).

A análise comparativa envolvendo a estrutura de análise da pesquisa com os resultados do estudo multicase permitiu o estabelecimento de seis proposições teóricas que “conectam” as três questões de pesquisa em uma única sentença. Conforme destacado na ACP, o **PC12 - Mistake proofing com o auxílio de CPS ou inteligência artificial** revelou-se como o ponto de convergência de maior evidência nas organizações, segundo a percepção dos entrevistados. A sua implementação envolveu tecnologias de automação incluindo sensores e atuadores, CLPs, RFID, IHM, sistema MES, inteligência artificial e sistemas de visão. Os resultados dessa integração incluem o bloqueio automático de erros humanos e a redução de custos decorrentes de falhas internas. Assim, esse exemplo permite a formulação da seguinte proposição:

- **Proposição 1: A implementação de “digital mistake proofing” requer a integração de sistemas e dispositivos, protocolos de comunicação e conhecimentos em inteligência artificial, de modo a possibilitar o bloqueio automático de erros humanos, resultando na redução de custos da não qualidade e falhas internas.**

A análise do estudo multicase também mostrou que a percepção a respeito do **PC2 - Medição de desempenho por meio de CPS e Big Data** se mostra alinhada com a percepção sobre o **PC10 - Monitoramento e controle da produção em tempo real**. Para implementar esses PCs, as empresas analisadas salientaram a importância dos requisitos de TI que incluem a integração de sistemas e tecnologias (BI, CLP e MES), assim como a necessidade de recursos de *hardware* que cobrem dispositivos móveis, *handheld* e telas *touch* para a visualização e controle digital da produção (*Andon* digital). Como resultado dessa integração, observou-se a gestão *paperless*, a informação em tempo real e o aumento da produtividade no chão de fábrica. Considerando que no âmbito da excelência operacional, a medição de desempenho expressa uma forma de controle dos processos, estabeleceu-se a seguinte proposição:

- **Proposição 2: O monitoramento da produção em tempo real por meio de “Andon digital” requer integração de sistemas, assim como a disponibilidade de dispositivos de comunicação (móveis ou fixos) para a visualização dos dados, permitindo o gerenciamento *paperless* e o aumento da produtividade no chão de fábrica.**

Dentre os princípios da mentalidade enxuta, destacam-se a programação puxada e o fluxo contínuo. Assim, enquanto o **PC6 – Logística interna auxiliada por tecnologias 4.0** abrange as técnicas voltadas para a promoção do fluxo contínuo dos materiais e o armazenamento dos componentes necessários à produção, o **PC9 – Digitalização do controle de estoques (*e-kanban*)**, se refere ao gerenciamento dos níveis de estoque e programação puxada. A implementação desses dois PCs envolveu a integração de sistemas e uso de sensores, comunicação *WiFi* e AGVs/AIVs, proporcionando a redução de desperdícios (principalmente com relação aos níveis de estoques), a redução custos e o aumento da eficiência logística. Isso suscita a seguinte proposição:

- **Proposição 3: A digitalização do controle de estoques (*e-kanban*) e a movimentação de materiais por meio de robôs móveis (AGV/AIV) requer a implementação de tecnologias de rede sem fio, protocolos de comunicação, sensoriamento e integração de sistemas. Essa prática resulta na redução de custos, eliminação de desperdícios e aumento da eficiência logística interna.**

O **PC1 – Mapeamento de processos auxiliado por CPS, Big Data e Simulação**, classificado na análise como “PC aderente”, pode complementar as tradicionais técnicas de mapeamento de processo, incluindo o VSM digital. Os requisitos necessários para a implementação deste PC incluem dispositivos RFID, *software* de simulação e análise de uma grande quantidade de dados provenientes do chão de fábrica. De acordo com os entrevistados, tal integração é capaz de aprimorar a análise de gargalos e viabilizar análises preditivas com base no histórico gerado no contexto do *Big Data*. Essa análise resulta na seguinte proposição:

- **Proposição 4: A análise de mapas de processos dinâmicos e digitalizados a partir de dados provenientes do CPS requer competências em *Big Data Analytics* e simulação computacional. Tais dados podem ser utilizados para otimizar recursos gargalos, identificar desperdícios em tempo real, reduzir custos operacionais e fomentar análises preditivas.**

Embora o **PC7 – Projeto de células de manufatura com auxílio de robótica e CPS** tenha sido classificado como “parcialmente aderente”, o exemplo observado em um dos casos revelou a possibilidade de uso de robótica colaborativa (COBOTs) em projetos de células de manufatura, com possibilidades de aplicação em estudos de balanceamento de linha. Esse tipo de robô não requer conhecimentos em programação e instalação da tecnologia, visto que sua programação é intuitiva e seus movimentos são “assimilados” por repetição. Assim, basta que o operador responsável manuseie um *tablet* ou oriente a movimentação dos braços e das garras do COBOT para que a tarefa seja registrada e repetida por ele. Em um experimento conduzido por Hoffman e Breazeal (2007), os autores observaram que a equipe na qual os operadores trabalharam colaborativamente com os robôs cuja função era antecipar algumas tarefas, a percepção a respeito das vantagens proporcionadas por essa tecnologia era maior. Além disso, o trabalho executado por essa equipe apresentou maior produtividade em comparação ao grupo de controle. Tais considerações originam na seguinte proposição:

- **Proposição 5: A robótica colaborativa pode ser inserida em estudos de balanceamento de linha e otimização de células de manufatura. Assumindo a programação intuitiva inerente aos COBOTs, a implementação dessa tecnologia não requer dos operadores competências de programação. Projetos desta natureza podem otimizar a eficiência do balanceamento e aumentar a produtividade nos postos de trabalho.**

Tanto a análise do **PC4 – Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS**, quanto a análise do **PC5 – Monitoramento de máquinas por meio de CPS e Big Data Analytics**, parece reforçar a importância de técnicas analíticas avançadas e uso de inteligência artificial no gerenciamento da qualidade. Percebe-se que a implementação dessas técnicas requer o domínio de competências específicas em *Data Science*, controles automatizados capazes de gerar alertas sobre desvios e interrupções, bem como o gerenciamento de banco de dados. Seguindo essa linha de raciocínio, Pysdek e Keller (2011) explicam que os profissionais que executam projetos LSS (principalmente os *black belts*), devem ser capazes de extrair conhecimento da base de dados da organização e possuir familiaridade com computadores, linguagem de programação e tecnologias associadas ao *Big Data*, tais como *data warehousing*, OLAP e *data mining*. Essa ideia vai de encontro com classificação proposta por Snee e Hoerl (2017), onde o “LSS 2.0” deverá incorporar técnicas analíticas em um novo paradigma de melhoria. Diante dessas considerações definiu-se a seguinte proposição:

- **Proposição 6: O monitoramento estatístico nos CPS e o monitoramento digital de máquinas requer o domínio de competências em *Data Science*, controles automatizados e infraestrutura de bando de dados. Essa atividade é capaz de gerar resultados em termos de análise preditiva, informação e intervenção em tempo real, assim como redução de custos decorrentes de falhas internas.**

As proposições apresentadas permitem diferenciar a aplicação das tecnologias digitais quanto a ênfase dada às abordagens de melhoria. Pode-se afirmar que, enquanto os PCs mais relacionados a abordagem LM (PC1, PC6, PC7, PC9, PC10 e PC12) parecem reforçar a aplicação de requisitos de automação e CPS para a promoção dos princípios *lean*, os PCs associados com abordagem SS (PC4 e PC5) ressaltam a utilização de *Big Data Analytics* e *Data Science* para a redução de falhas, defeitos e custos operacionais. Contudo, percebe-se que ambas as abordagens são capazes de aumentar a competitividade organizacional.

Considerando a baixa percepção a respeito da implementação dos PCs classificados como “não aderentes” (PC8, PC11 e PC13) e “parcialmente aderentes” (PC3), optou-se por não estabelecer proposições a respeito desses PCs. Contudo, isso não significa que a integração entre esses pontos não pode ser significativa para outras empresas. Além disso, cabe destacar que os 13 PCs que constituíram a estrutura de análise desta pesquisa foram extraídos da recente literatura sobre o tema, com base em estudos empíricos prévios. De outro modo, os resultados do estudo de campo revelaram mais 2 PCs não identificados no referencial teórico, sendo o primeiro o **Uso de *Big Data Analytics* para auxiliar estudos de FMEA**, citado por DT1, e o segundo ***Data Science* aplicada à análise de causalidade e função de transferência**, observado *a posteriori* durante a análise intercasos.

Este último PC pode fornecer um novo enfoque para a aplicação de diversas técnicas estatísticas nos projetos LSS, tais como análise descritiva, testes de hipóteses, análise de correlação e regressão, planejamento de experimentos, MSA e análise multivariada, por meio de aplicativos comumente utilizados em *Data Science* e *Deep Learning*, incluindo R, Pandas, Python, TensorFlow etc. Visto que *Data Science* representa um conjunto de princípios que norteiam a extração de conhecimento a partir de um conjunto de dados (FAWCETT; PROVOST, 2018), o uso desses aplicativos pode ser empregado para facilitar a compreensão da função de transferência de um processo durante a investigação das relações causais entre os Y's e X's de um projeto LSS.

Embora os requisitos de competências não se destacam nas proposições aqui apresentadas, isso não significa que eles não sejam importantes para a implementação dos PCs. Ao contrário da ênfase dada aos requisitos de TI e automação, que se alternam de acordo com a natureza dos PCs, os requisitos de competência são genéricos e se aplicam a todos os exemplos de integração.

### 5.3 IMPLICAÇÕES GERENCIAIS

Após a condução da pesquisa empírica ficou evidente a necessidade de uma “gestão da mudança” para o sucesso das estratégias de transformação digital e implementação dos PCs nas organizações. A mudança na rotina dos processos permeia todos os elementos da estrutura de análise da pesquisa e podem exigir uma nova mentalidade dos líderes e colaboradores envolvidos em projetos relacionados a I4.0. Essa ideia é compartilhada por Kane *et al* (2015), que esclarecem que a relação entre tecnologias digitais e cultura organizacional requer uma mudança de mentalidade dos líderes antes de se iniciar a mudança tecnológica. Além disso, as proposições apresentadas requerem investimentos em infraestrutura de TI e arquitetura de redes e automação. Essa condição fica bem clara ao observar o nível de automação no qual duas empresas foram classificadas. Considerando que os CPS são capazes de prover dados em tempo real de operadores, máquinas e materiais por meio de tecnologias de automação industrial e integração de sistemas (QU *et al.*, 2012; WANG *et. al.*, 2012), os projetos envolvendo esse tipo de arquitetura poderão impor às organizações a necessidade de observação de requisitos legais, técnicos e disponibilidade de recursos financeiros e humanos.

Ao contrário das práticas de excelência operacional (OPEX), que não demandam grande investimentos e as melhorias emanam de ações implementadas a curto e médio prazos (*kaizen* e projetos LSS), com base no conhecimento adquirido pelos participantes, a implementação de tecnologias I4.0 pode requerer investimentos com a aquisição de recursos digitais (CAPEX) e demandar um tempo maior para sua implementação (MÜLLER *et al.*, 2018). Deste modo, a infraestrutura de TI pode exigir a coordenação entre os recursos de *hardware*, *software*, tecnologias de gestão de dados, tecnologias de rede e prestação de serviços (LAUDON; LAUDON 2010). Na visão desses autores, uma importante decisão recai sobre a questão “*make or buy*”, ou seja, a decisão entre prover toda a infraestrutura internamente ou contratar fornecedores para este objetivo (*outsourcing/outtasking*). Tal decisão foi confirmada durante a pesquisa empírica e merece uma reflexão no âmbito gerencial.

Embora a implementação dos PCs possa requerer investimentos com a aquisição de tecnologias digitais, os resultados decorrentes da integração entre essas tecnologias e as práticas LSS podem superar os resultados proporcionados pelos projetos LSS tradicionais, visto que as tecnologias I4.0 são capazes de otimizar a tomada de decisão ao disponibilizar em tempo real uma grande quantidade de dados provenientes do chão de fábrica, assim como aumentar a eficiência dos processos por meio equipamentos modernos instalados a partir de estratégias de “*retrofit*”. Sob esse aspecto, Pessôa e Spínola (2014) explicam que os sistemas de automação industrial que utilizam controles *online* e em tempo real, tendem a reduzir custos, aumentar a qualidade e prevenir falhas de funcionamento de equipamentos.

Cabe ressaltar que no período de análise dos resultados da pesquisa, o mundo vivenciou uma crise sanitária decorrente do surto do coronavírus (Covid-19), que impulsionou o trabalho remoto a fim de assegurar o distanciamento social. Neste ínterim, pode-se dizer que boa parte das organizações investiram em infraestrutura de TI e aceleraram a transição para uma cultura digital de modo a promover a integração de sistemas, assim como a capacitação e a operacionalização das atividades *on-line*. Considerando que a implementação dos PCs é capaz de gerar mudanças incrementais nos processos de manufatura, entende-se que o papel dos líderes envolvidos requer competências comportamentais (*soft skills*), incluindo liderança e gestão da mudança. Esse entendimento é reforçado pelas menções dos entrevistados sobre a necessidade de uma “cultura pró-digitalização” e “*mindset* aberto”.

As implicações gerenciais discutidas acima vão de encontro com os resultados de uma pesquisa *survey* conduzida em parceria entre as instituições BCG, ASQ e DGQ, onde foram entrevistados gerentes e executivos de 221 empresas instaladas em países líderes no processo de transformação digital, incluindo Alemanha, USA, China, Japão e outros 14 países europeus. Embora o foco dessa pesquisa tenha sido direcionado para a aplicação de tecnologias digitais voltadas para a “Qualidade 4.0”, as respostas fornecidas pelos entrevistados corroboram os componentes apresentados na Figura 17. Na opinião desses executivos, os requisitos técnicos mais importantes para a transformação digital compreendem (KÜPPER *et al.*, 2019): infraestrutura de TI, competências em análise de dados e *soft skills* (tais como gestão da mudança, comunicação e trabalho em equipe). O emprego de métodos ágeis e PoCs também foi mencionado na pesquisa. Quanto aos potenciais resultados associados à Qualidade 4.0, os entrevistados destacaram o monitoramento de processos em tempo real, análise preditiva, aumento de produtividade, redução dos custos da má qualidade e vantagem competitiva. Tais resultados também foram destacados no estudo empírico desta tese.

#### 5.4 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Conforme justificado na seção método da pesquisa, os estudos de natureza qualitativa consideram as percepções individuais dos envolvidos. Assim, a narrativa descrita nos estudos de caso aqui apresentados limita-se à interpretação das percepções dos entrevistados por meio de análise de conteúdo. Contudo, o projeto de estudo de caso deve considerar aspectos relacionados à qualidade e confiabilidade da pesquisa. Neste contexto, pode-se dizer que a validade da estrutura de análise da pesquisa foi pautada na RSL que reuniu trabalhos publicados em periódicos com revisão por pares (*peer review*) e fator de impacto. Por outro lado, a validade externa foi verificada a partir da replicação da estrutura de análise da pesquisa nos dois casos.

Com o intuito de assegurar a consistência das respostas fornecidas pelos entrevistados, a análise dos dados foi apoiada por técnicas estatísticas incluindo escala Likert, alpha de Cronbach, análise descritiva, testes de hipótese não paramétricos e análise multivariada. Entretanto, é importante ressaltar que tais técnicas foram aplicadas para direcionar as investigações em profundidade (*mining questions*), avaliar o grau de confiabilidade das respostas e ampliar a consistência da análise intercasos. Deste modo, destaca-se que os resultados discutidos nesta tese estão limitados às duas empresas investigadas, sem a pretensão de generalização.

Outros métodos de pesquisa poderão generalizar os resultados apresentados ao envolver um número significativo de participantes ou de casos. Neste contexto, estudos de levantamento do tipo *survey* poderão ser desenvolvidos para captar a percepção de profissionais de um determinado seguimento econômico quanto à aderência da estrutura de análise de pesquisa nesse seguimento. De outro modo, experimentos direcionados para PCs específicos poderão ser conduzidos com o intuito de observar os resultados proporcionados por esses PCs, comparando-os com os resultados decorrentes do processo tradicional (grupo de controle).

Os estudos de caso revelaram a não aderência de quatro PCs: **PC3 - QFD auxiliado por Big Data Analytics**; **PC8 - Uso de Data Science para redução dos tempos de setup**; **PC11 Controle da qualidade com o auxílio de robótica avançada**; e **PC13 – Uso de realidade aumentada para auxiliar atividades operacionais**. Dado que essas interações não foram investigadas em profundidade nas entrevistas por apresentarem baixos IRFs, as informações referentes aos componentes da estrutura de análise da pesquisa nesses PCs não foram evidenciadas. Essa limitação pode ser atenuada em futuros estudos empíricos, cujo escopo reúnam esses PCs.

Esta tese apresentou uma análise dos pontos de convergência entre as práticas LSS e as tecnologias I4.0 em duas empresas de manufatura, que atuam no seguimento de fabricação de caminhões, reboques e componentes estruturais automotivos. Os resultados sugerem que a estrutura de análise da pesquisa conceitual mostrou-se aderente às práticas evidenciadas nas organizações investigadas. Tais resultados forneceram *insights* e respostas às questões de pesquisa de modo a ampliar o entendimento sobre o tema da pesquisa. As informações contidas neste estudo poderão auxiliar os praticantes da abordagem LSS no desenvolvimento de projetos de excelência operacional integrados às tecnologias da I4.0.

## REFERÊNCIAS

ADOLPHS, P., BEDENBENDER, H., DIRZUS, D., EHLICH, M., EPPLE, U., HANKEL, M.; KOZIOLEK, H. **Reference architecture model industrie 4.0** (rami4. 0). ZVEI and VDI, Status Report, 2015. Disponível em: <<https://www.zvei.org>>. Acesso em 02.01.2019.

AGARWAL, N.; BREM, A. Strategic business transformation through technology convergence: Implications from General Electric's industrial internet initiative. **International Journal of Technology Management**, v.2, n. 67, p. 196-214, 2015.

ANDERSSON, R., HILLETOFTH, P., MANFREDSSON, P.; HILMOLA, O. P. Lean Six Sigma strategy in telecom manufacturing. **Industrial Management & Data Systems**, v. 114, n.6, p. 904-921, 2014.

ANTE, G., FACCHINI, F., MOSSA, G.; DIGIESI, S. Developing a key performance indicators tree for lean and smart production systems. **IFAC-PapersOnLine**, v.51, n. 11, p. 13-18, 2018.

ANTONY, J. Some pros and cons of six sigma: an academic perspective. **The TQM Magazine**, v. 16, n. 4, p. 303-6, 2004.

ARNHEITER, E. D.; MALEYEFF, J. The integration of lean management and Six Sigma. **The TQM magazine**, v. 17, n. 1, p. 5-18, 2005.

AZEVEDO, M. T. **Transformação digital na indústria: indústria 4.0 e a rede de água inteligente no Brasil**. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

BAESENS, B. **Analytics in a big data world: the essential guide to data Science and its applications**. New Jersey: Wiley & SAS business series, 2014.

BAL, A.; SATOGLU, S. I. **Maintenance management of production systems with sensors and RFID: a case study**. In Global conference on engineering and technology management (GCETM) pp. 82-89, 2014.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.

BARTODZIEJ, C. J. **The Concept Industry 4.0: An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics**. Springer, 2016.

BASS, I; LAWTON, B. **Lean Six Sigma: Using SigmaXL and Minitab**. McGraw-Hill, 2009.

BAYGIN, M.; YETIS, H.; KARAKOSE, M.; AKIN E. **Effect analysis of industry 4.0 to higher education**, 15th International Conference on IEEE, 2016.

BAYRAM, B.; YNCE, G. **Advances in Robotics in the Era of Industry 4.0. In Industry 4.0: Managing The Digital Transformation**. p. 187-200. Springer, Cham, 2018.

- BEYCA, O. F., HANCERLIOGULLARI, G.; YAZICI, I. **Additive Manufacturing Technologies and Applications. In Industry 4.0: Managing The Digital Transformation.** p. 217-234. Springer, Cham, 2018.
- BLAINEY, G. **Uma breve história do mundo.** 2.ed. São Paulo: Editora Fundamento, 2008.
- BRANDENBURGER, J.; COLLA, V.; NASTASI, G.; FERRO, F.; SHIRM, C.; MELCHER, J. Big Data Solution for Quality Monitoring and Improvement on Flat Steel Production. **IFAC-Papers OnLine** n.49, v.20, p. 55-60, 2016.
- BRETTEL, M., FRIEDERICHSEN, N., KELLER, M.; ROSENBERG, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering**, v. 8, n.1, p. 37-44, 2014.
- BRYMAN, A. **Research methods and organization studies.** New York, Unwin Hyman, 1989.
- BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies.** WW Norton & Company, 2014.
- CANIATO, F.; DORAN, D.; SOUSA, R.; BOER H. Designing and developing OM research—from concept to publication. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 38, n. 9, p. 1836-1856, 2018.
- CARPANZANO, E., BETTONI, A., JULIER, S., COSTA, J. C., & OLIVEIRA, M. **Connecting Humans to the Loop of Digitized Factories' Automation Systems.** In International Conference on the Industry 4.0 model for Advanced Manufacturing. p. 180-193. Springer, Cham, 2018.
- CARVALHO, M. C. M. **A construção do saber científico: algumas proposições.** In: CARVALHO, M.C.M. (Org). **Construindo o saber.** 2. Ed. Campinas: Papirus, 2000.
- CHALMERS, A. F. **O que é ciência, afinal?** São Paulo: Brasiliense, 1993.
- CHEN, T.; LIN, Y. C. Feasibility evaluation and optimization of a smart manufacturing system based on 3d printing: a review. **International Journal of Intelligent Systems**, v.32, n.4, p. 394-413, 2017.
- CHIARINI, A.; VAGNONI, E. A proposed audit pattern for the shop-floor processes in TQM, Lean Six Sigma and ISO 9001 environments. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 18, n. 2, p. 159-178, 2014.
- COLOMBO, A. W.; KARNOUSKOS, S.; KAYNAK, O.; SHI, Y.; YIN, S. Industrial Cyberphysical Systems: A Backbone of the Fourth Industrial Revolution. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v.1, n. 11, p. 6-16, 2017.

CONSTANTINESCU, C. L.; FRANCALANZA, E.; MATARAZZO, D.; BALKAN, O. **Information support and interactive planning in the digital factory**: Approach and industry-driven evaluation. 8th International Conference on Digital Enterprise Technology, 2014.

COOPER, K. P.; WACHTER, R. F. Cyber-enabled manufacturing systems for additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 5, p. 355-359, 2014.

CORBETT, L. M. Lean Six Sigma: the contribution to business excellence. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 2, n. 2, p. 118-131, 2011.

CORBIN, J. M.; STRAUSS, A. **Grounded theory research**: Procedures, canons, and evaluative criteria. *Qualitative sociology*, v. 13, n. 1, p. 3-21, 1990.

COUTINHO, L.G. A terceira revolução industrial e Tecnológica. **Economia e Sociedade**, n. 1. Campinas, Instituto de Economia UNICAMP, 1992.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa**: métodos qualitativo, quantitativo e misto. Tradução Luciana de Oliveira da Rocha, 2ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

DAUDT, G.; WILLCOX, L. D. **Reflexões críticas a partir das experiências dos Estados Unidos e da Alemanha em manufatura avançada**. BNDES Setorial. N. 44, p. 5-45, 2016. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br>>. Acesso em 24.07.2017.

DAVENPORT, T. H.; BARTH, P.; BEAN, R. How 'big data' is different. **MIT Sloan Management Review**, 2012.

DAVENPORT, T.H.; KIM, J. Keeping up with the quants: Your Guide to Understanding and Using Analytics. **Harvard Business Review Press**, 2013.

DE MAST, J.; LOKKERBOL, J. An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. **International Journal of Production Economics**, v. 139, n. 2, p. 604-614, 2012.

DEMCHENKO, Y.; GROSSO, P.; DE LAAT, C.; MEMBREY, P. **Addressing big data issues in scientific data infrastructure**. In International Conference on Collaboration Technologies and Systems. IEE. p. 48-55, 2013.

DEMCHUK, L.; BAIT SAR, R. Combined usage of Theory of Constraints, Lean and Six Sigma in quality assurance of manufacturing processes. **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications, p. 21-26, 2015.

DEVEZAS, T.; LEITÃO, J.; SARYGULOV, A. **Industry 4.0**: entrepreneurship and structural change in the new digital landscape. *Gewerbestrasse*: Springer, 2017.

DEZORDI, L. L. **Fundamentos de Economia**. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2008.

DRESCH, A.; LACERDA, D.; ANTUNES, J. A. V. **Design science research**. In: **Design Science Research**. Springer, Cham, p. 67-102, 2015.

- ECKES, G. **The Six Sigma revolution**: How General Electric and others turned process into profits. John Wiley & Sons, 2002.
- EISENHARDT, K. M. Building theories from case study research. **Academy of management review**, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.
- ELEFTHERIADIS, M. S. R. J.; MYKLEBUST, O. **A guideline of quality steps towards zero defect manufacturing in industry**. In Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag p. 332-340, 2016.
- EROL, S., JÄGER, A., HOLD, P., OTT, K.; SIHN, W. Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. **Procedia CIRP**, 54, p. 13-18, 2016.
- ESENGÜN, M.; İNCE, G. **The Role of Augmented Reality in the Age of Industry 4.0**. In: **Industry 4.0: Managing The Digital Transformation**. Springer, Cham. p. 201-215, 2018.
- ERVURAL, B. C.; ERVURAL, B. **Overview of cyber security in the industry 4.0 Era**. In **Industry 4.0: Managing The Digital Transformation**. p. 267-284. Springer, Cham, 2018.
- FARAH JÚNIOR, M. F. A terceira revolução industrial e o novo paradigma produtivo: algumas considerações sobre o desenvolvimento industrial brasileiro nos anos 90. **Revista FAE**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 45-61, 2000.
- FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P. **Análise de Dados: Técnicas multivariadas exploratórias com SPSS e Stata**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- FAWCETT, T.; PROVOST, F. **Data Science para Negócios**: O que você precisa saber sobre mineração de dados e pensamento analítico de dados. Alta Books Editora, 2018.
- FILIPPINI, R. Operations management research: some reflections on evolution, models and empirical studies in OM. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 17, n. 7, p. 655-670, 1997.
- FREITAS, A.C.; MAIO, A.F.; MAIA, P.; GOMES, N.; NOGUEIRA, A.; FERNANDES, J.M.; MACHADO, S. (2017). Savings in internal logistics using a RFID-based software system in a lean context. In **Proceedings of International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE**, Lisboa.
- FRIEDMAN, T. L. **O mundo é plano**: uma breve história do século XXI. Rio de Janeiro: Objetiva, 2005.
- GEORGE, M. L. **Lean Six Sigma**: Combining Six Sigma Quality with Lean Speed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- GONÇALVES, R. J.; ROMERO, D.; GRILO, A. Factories of the future: challenges and leading innovations in inteligente manufacturing. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**. v. 30, n.1, p. 4-14, 2017.
- GILCHRIST, A. **Introducing Industry 4.0**. In: **Industry 4.0**. Apress, 2016.

- GUIMIRE, S.; LUIS-FERREIRA F.; NODEHI T.; GONÇALVES, R, J. IoT based situational awareness framework for real-time Project management. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v.30, n. 1, p. 74-83, 2017.
- GUO, T.; PAPAIOANNOU, T. G.; ABERER, K. Efficient indexing and query processing of model-view sensor data in the cloud. **Big Data Research**, n. 1, p. 52-65, 2014.
- GUTIERREZ-GUTIERREZ, L.; DE LEEUW, S.; DUBBERS, R. Logistics services and Lean Six Sigma implementation: a case study. **International Journal of Lean Six Sigma**, v.7, n.3, p. 324-342, 2016.
- HEDELIND, M.; JACKSON, M. How to improve the use of industrial robots in lean manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 22, n.7, p. 891-905, 2011.
- HEIZER, J.; RENDER, B. **Administração de Operações: Bens e Serviços**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2001.
- HIRSCH, K. H. Digitization of industrial work: development paths and prospects. **Journal for Labour Market Research**, n.49, 2016.
- HOERL, R.W.; SNEE, R.D.; DE VEAUX, R.D. Applying statistical thinking to ‘Big Data’ problems. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 6, n. 4, p. 222-232, 2014.
- HOFFMAN, G.; BREAZEL, C. Effects of anticipatory action on human-robot teamwork efficiency, fluency, and perception of team. In: **Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction**. 2007. p. 1-8.
- HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23-34, 2017.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **A ciência da fábrica**. 3ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- HUANG, Y.; LI, G.; **Descriptive models for internet of things**. International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2010.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **ISO/TS 15066**. Robots and Robotic Devices Collaborative Robots, document, 2016.
- ISMYRLIS, V.; MOSCHIDIS, O. Six Sigma's critical success factors and toolbox. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 4, n. 2, p. 108-117, 2013.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry**. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion, 2013. Disponível em < <https://www.acatech.de>>. Acesso em 25.09.2018.
- KANE, G. C.; PALMER, D.; PHILLIPS, A. N.; KIRON, D. Is your business ready for a digital future? **MIT Sloan Management Review**, v. 56, n. 4, 2015.

KARTHI, S.; DEVADASAN, S. R.; MURUGESH, R. Integration of lean six-sigma with ISO 9001: 2008 standard. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 2, n. 4, p. 309-331, 2011.

KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.

KOLBERG, D., KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. **International Journal of Production Research**, v.55, n. 10, p. 2845-2856, 2017.

KRAMMER, P., NEEF, D.; PLAPPER, P. Advanced manufacturing technologies for general assembly. N. 2011-01-1253. **SAE Technical Paper**, 2011.

KRÜGER, J., BERNHARDT, R., SURDILOVIC, D.; SPUR, G. Intelligent assist systems for flexible assembly. **CIRP annals**, v.55, n.1, p. 29-32, 2006.

KULKARNI, S.; VERMA, P.; MUKUNDAN, R. Assessing manufacturing strategy definitions utilising text-mining. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 14, p. 4519-4546, 2019.

KULL, H. **Mass customization**: Opportunities, methods, and challenges for manufacturers. Apress, 2015.

KUMAR, S. R.; MCCREARY, M.; NOTTESTAD, D. A. Quantifying supply chain trade-offs using six sigma, simulation, and designed experiments to develop a flexible distribution network. **Quality Engineering**, v. 23, n. 2, p. 180-203, 2011.

KUMAR, S.; GOPAL, R. Integrating Six Sigma culture and TPM framework to improve manufacturing performance in SMEs. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 30, n. 5, p. 745-765, 2014.

KÜPPER, D.; KNIZEK, C.; RYESON, D.; NOECKER, J. **Quality 4.0 takes more than technology**. Boston Consulting Group, 8, 2019.  
Disponível em: < <https://www.bcg.com>>. Acesso em 23.07.2020.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2001.

LANDE, M.; SHRIVASTAVA, R. L.; SETH, D. Critical success factors for Lean Six Sigma in SMEs (small and medium enterprises). **The TQM Journal**, v. 28, n. 4, p. 613-635, 2016.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business and Information Systems Engineering**, n. 6, v. 4, p. 239-242, 2014.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P.E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, v. 475, 2011.

LASOTA, P. A.; SHAH, J. A. Analyzing the effects of human-aware motion planning on close-proximity human–robot collaboration. **Human factors**, v. 57, n. 1, p. 21-33, 2015.

LAUDON, K.; LAUDON, J. **Sistemas de informação gerenciais**. 9ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LAUX, C.; SPRINGER, J.; SELIGER, C.; LI, N. Impacting big data analytics in higher education through six sigma techniques. **International Journal of Productivity and Performance Management**. v. 66, 2017.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach**. v.6. 2011. Disponível em: <<http://leeseshia.org>>. Acesso em: 14.08.2017

LEE, I.; LEE K. The internet of things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. **Business Horizons**, n. 58, p. 431-440, 2015.

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

LEE, M.; CHANG, T. Combination of theory of constraints, root cause analysis and Six Sigma for quality improvement framework. **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 10, n. 4, p. 447-463, 2012.

LEGARD, R.; KEEGAN, J.; WARD, K. **In-depth interviews**. In: **Qualitative research practice: A guide for social science students and researchers**, v. 6, n. 1, p. 138-169, 2003.

LEONARD-BARTON, D. A dual methodology for case studies: Synergistic use of a longitudinal single site with replicated multiple sites. **Organization science**, v. 1, n. 3, p. 248-266, 1990.

LEYH, C., BLEY, K., SCHÄFFER, T.; FORSTENHÄUSLER, S. **SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0**. In Computer Science and Information Systems (FedCSIS), p. 1297-1302. IEEE, 2016.

LI, J.; TAO, F.; CHENG, Y.; ZHAO, L. Big data in product lifecycle management. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 81(1-4), 667-684, 2015.

LICHTBLAU, K., STICH, V., BERTENRATH, R., BLUM, M., BLEIDER, M., MILLACK, A.; SCHRÖTER, M. **IMPULS-industrie 4.0-readiness**. Impuls-Stiftung des VDMA, Aachen-Köln, 2015.

LIKER, J. K. **The toyota way**. Esensi, 2005.

LIU, Y.; XU, X. Industry 4.0 and cloud manufacturing: a comparative analysis. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. v. 139, 2017.

LUCKE, D. CONSTANTINESCU, C.; WESTKÄMPER. **Smart factory: a step towards the next generation of manufacturing**. The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2008.

LUGERT, A., VÖLKER, K.; WINKLER, H. Dynamization of Value Stream Management by technical and managerial approach. **Procedia CIRP**, v. 72, n.1, p. 701-706, 2018.

MA, J.; WANG, Q.; ZHAO, Z. SLAE–CPS: Smart Lean Automation Engine Enabled by Cyber-Physical Systems Technologies. *Sensors*, v.17, n. 7, p. 1500, 2017.

MAYR, A., WEIGELT, M., KÜHL, A., GRIMM, S., ERLI, A., POTZEL, M., & FRANKE, J. Lean 4.0-A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 72(1), 622-628, 2018.

MANLY, B.F.J. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2008.

MARQUES, P. A.; MEYRELLES, P.M.; SARAIVA P. M.; FRAZAO-GUERREIRO, F.J. **Integrating Lean Six Sigma with ISO 9001:2015**. International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 4–7 December, p. 894-898, 2016.

MARQUES, M.; AGOSTINHO, C.; ZACHAREWICZ, G.; GONÇALVES, R. J. Decentralized decision support for inteligente manufacturing in industry 4.0. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*. n. 9, p. 299-313, 2017.

MARR, B. **Big data: using smart big data, analytics and metrics to make better decisions and improve performance**. John Wiley & Sons Ltd., 2015.

MARTINS, R.A. **Princípios da Pesquisa Científica**. In: Cauchick, P. M. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012a.

MARTINS, R.A. **Abordagens Quantitativa e Qualitativa**. In: Cauchick, P. M. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012b.

MATALLO JR, H. **A problemática do conhecimento**. In: CARVALHO, M.C.M. (Org.). **Construindo o saber**. 2. Ed. Campinas: Papirus, 2000.

MAXIMIANO, A. C. A.: **Teoria geral da administração: da revolução urbana à revolução digital**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

MCFARLANE, D., GIANNIKAS, V., WONG, A. C.; HARRISON, M. Intelligent products in the supply chain-10 years on. *IFAC Proceedings Volumes*, v.45, n. 6, p. 655-660, 2012.

MEHRJERDI, Y. Z. Six-sigma: methodology, tools and its future. *Assembly Automation*. v. 31, n. 1, p. 79-88, 2011.

MIGUEL, P. A.; LEE HOO, L. **Levantamento tipo survey**. In: Cauchick, P. M. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

MIGUEL, P. A. C.; SOUSA, R. **O método do estudo de caso na engenharia de produção**. 2012. In: Cauchick, P. M. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

MISHRA, P.; KUMAR SHARMA, R. A hybrid framework based on SIPOC and Six Sigma DMAIC for improving process dimensions in supply chain network. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 31, n. 5, p. 522-546, 2014.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.

MONTGOMERY, D. C.; WOODALL, W. H. An overview of six sigma. **International Statistical Review**, v. 76, n. 3, p. 329-346, 2008.

MORABITO, R.; PUREZA, V. **Modelagem e Simulação**. In: Cauchick, P. M. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. Towards lean production in industry 4.0. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 466-473, 2017.

MÜLLER, J.M.; BULIGA, O.; VOIGT, K. Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 2-17, 2018.

NAKANO, D. **Métodos de pesquisa adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. In: Cauchick, P. M. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

NERADILOVA, H.; FEDORKO, G. Simulation of the Supply of Workplaces by the AGV in the Digital Factory. **Procedia engineering**, v. 192, p. 638-643, 2017.

NETTO, A. V., TAHARA, C. S., PORTO, A. J. V., GONÇALVES FILHO, E. V. Realidade virtual e suas aplicações na área de manufatura, treinamento, simulação e desenvolvimento de produto. **Gestão & Produção**, v. 5, n.2, p. 104-116, 1998.

NICOLETTI, B. **Lean and automate manufacturing and logistics**. In: **IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems**. Berlin: Springer, p. 278-285, 2013.

O'DONOVAN, P.; LEAHY, K.; BRUTON, K.; O'SULLIVAN, D. T. J. Big data in manufacturing: a systematic mapping study. **Journal of Big Data**, v.1, n. 2, 2015.

OKHOVAT, M.A.; ARIFFIN, M.K.A.M.; TARAVATSADAT, N.; HOSSEINI, S.A. Development of world class manufacturing framework by using six-sigma, total productive maintenance and lean. **Scientific Research and Essays**. v.7, p. 4230-4241, 2012.

OPRIME, P. C.; DONADONE, J. C.; SORIANO, F. R. **Análise da teoria e práticas da melhoria contínua nos programas seis sigma**. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte, 2011.

PACHECO, D. A. J. Theory of constraints, lean manufacturing and six sigma: limits to and possibilities for integration. **Production**, v. 24, n. 4, p. 940-956, 2014.

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. **Estratégia Seis Sigma**. Como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PEPPER, M. P. J.; SPEDDING, T. A. The evolution of lean six sigma. **International Journal of Quality & Reliability Management**. v. 27, n. 2, 2010.

PESSÔA, M.; SPÍNOLA, M. **Introdução à automação**: para cursos de engenharia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

PÉREZ, J. B., ARRIETA, A. G., HERNÁNDEZ, E. A., QUEIRUGA, D. A. **Industrial Cyber-Physical Systems in Textile Engineering**. In International Conference on European Transnational Education (pp. 126-135). Springer International Publishing, 2016.

PFEIFFER, T.; HELLMERS, J.; SCHÖN, E.; THOMASCHEWSKI, J. Empowering User Interfaces for Industrie 4.0. **Proceedings of the IEEE**. v. 5, n. 104, p. 986-996, 2016.

PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How smart, connected products are transforming competition. **Harvard Business Review**. v. 11, n. 92, 2014.

POWELL, D., ROMERO, D., GAIARDELLI, P., CIMINI, C., CAVALIERI, S. **Towards Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: Industry 4.0 Technologies as Enablers of Leaner Production**. Advances in Production Management Systems. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018

PROTZMAN, C.; WHITON, F.; KERPCHEAR, J.; LEWANDOWSKI, C.; STENBERG, S.; GROUNDS, P. **The Lean Practitioner's Field Book**: Proven, Practical, Profitable and Powerful Techniques for Making Lean Really Work. CRC Press, 2016.

PYSDEK, T.; KELLER, P. A. **Seis Sigma guia do profissional**: um guia completo para green belts, black belts e gerentes em todos os níveis. Rio de Janeiro: Alta Books, 2011.

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.

QU, T.; YANG, H.D.; HUANG, G.Q.; ZHANG, Y.F.; LUO, H.; QIN, W. A case of implementing RFID-based real-time shop-floor material management for household electrical appliance manufacturers. **RANE**, v. 23, n. 6, p. 2343-2356, 2012.

QUEIROZ, A. A. F. S. L., BOTTER, R. C., PINTO, M. M. D. O., & PEREIRA, S. C. F. Análise de práticas na indústria naval: contribuições para a construção de redes de suprimentos. **Production**, v. 25, n. 4, p. 864-875, 2015.

RANE, A. B.; SUNNAPWAR, V. K.; CHARI, N. R.; SHARMA, M. R.; JORAPUR, V. S. Improving performance of lock assembly line using lean and simulation approach. **International Journal of Business Performance Management**. v. 18, n.1, p. 101-124, 2017.

ROBERTS, R. J.; WILSON, A. E.; QUEZADO, Z. Using Lean Six Sigma methodology to improve quality of the anesthesia supply chain in a pediatric hospital. **Anesthesia and Analgesia**, n. 124, p. 922-924, 2017.

- ROBLA-GÓMEZ, S., BECERRA, V. M., LLATA, J. R., GONZALEZ-SARABIA, E., TORRE-FERRERO, C.; PEREZ-ORIA, J. Working together: A review on safe human-robot collaboration in industrial environments. **IEEE Access**, n. 5, p. 26754-26773, 2017.
- ROBLEK, V., MEŠKO, M.; KRAPE, A. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, April-June, n. 6, 2016.
- ROESCH, S. M. A. **Projetos de estágio e de pesquisa em administração**: guia para estágios, trabalhos de conclusão, dissertações e estudos de caso. São Paulo: Atlas, 2006.
- ROMERO, D., STAHR, J., WUEST, T., NORAN, O., BERNUS, P., FAST-BERGLUND, Å.; GORECKY, D. **Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies**. In Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46), Tianjin, China p. 29-31, 2016.
- ROMERO, D., GAIARDELLI, P., POWELL, D., WUEST, T.; THÜRER, M. **Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: The Emergence of Digital Lean Manufacturing and the Significance of Digital Waste**. In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. p. 11-20. Springer, Cham, 2018.
- ROTHER, M. **Toyota Kata**: gerenciando pessoas para melhoria, adaptabilidade e resultados excepcionais. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar**: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício: manual de trabalho de uma ferramenta enxuta. Lean Institute Brasil, 2007.
- ROWLEY, J.; SLACK, F. Conducting a literature review. **Management research news**, v. 27, n. 6, p. 31-39, 2004.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence**: A modern approach. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995
- RÜßMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**. Boston Consulting Group, 9, 2015.  
Disponível em: < <https://www.bcg.com>>. Acesso em 26.09.2018.
- SAI, V.C.; SHCHERBAKOV, M. V.; TRAN, V. P. Data-Driven Framework for Predictive Maintenance in Industry 4.0 Concept. In Conference on Creativity in Intelligent Technologies and Data Science (pp. 344-358). Springer, Cham, p. 344-358, 2019.
- SALAH, S.; RAHIM, A.; CARRETERO, J. A. The integration of Six Sigma and lean management. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 1, n. 3, p. 249-274, 2010.
- SALKIN, C., ONER, M., USTUNDAG, A.; CEVIKCAN, E. **A conceptual framework for Industry 4.0**. In **Industry 4.0: Managing The Digital Transformation**. p. 3-23. Springer, Cham, 2018.

SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. **Journal of Industrial Engineering and Management**. v.3, n. 9, 811-833, 2016.

SANDERS, A., SUBRAMANIAN, K. R., REDLICH, T.; WULFSBERG, J. P. **Industry 4.0 and Lean Management–Synergy or Contradiction? In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems**. p. 341-349. Springer, Cham, 2017.

SATOGLU, S., USTUNDAG, A., CEVIKCAN, E.; DURMUSOGLU, M. B. **Lean Production Systems for Industry 4.0. In Industry 4.0: Managing The Digital Transformation**. p. 43-59. Springer, Cham, 2018.

SCHMITT, M., MEIXNER, G., GORECKY, D., SEISSLER, M.; LOSKYLL, M. Mobile interaction technologies in the factory of the future. **IFAC Proceedings Volumes**. v. 46, n.15, p. 536-542, 2013.

SCHUH, G.; ANDERL, R.; GAUSEMEIER, J.; TEN HOMPEL, M.; WAHLSTER, W. **Industrie 4.0 Maturity Index**. Managing the Digital Transformation of Companies. Munich: Herbert Utz, 2017.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia CIRP**, n. 52, p.161-166, 2016.

SCHUSTER, K.; GROß K.; VOSSEN, R.; RICHERT, A.; JESCHKE, S. **Preparing for industry 4.0: collaborative virtual learning environments in Engineering Education**. Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering. Springer International Publishing, 2016.

SCHWAB, K. **The fourth industrial revolution**. New York: Crown Business, 2017.

SELLTIZ, C. et al. **Métodos de pesquisa nas relações sociais**, 6ª. Reimpressão EPU. São Paulo: Editora USP, 1975.

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

SHERRATT, C. S.; SCHLABACH, M. L. The applications of concept mapping in reference and information services. **RQ**, p. 60-69, 1990.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SNEE, R. D. Six sigma: the evolution of 100 years of business improvement methodology. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**. v. 1, n.1 p. 4-20, 2004.

SNEE, R. D. Lean six sigma: getting better all the time. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 1, n.1, p. 9-29, 2010.

SNEE, R. D.; HOERL, R. W. Time for Lean Six Sigma 2.0? **Quality Progress**, v. 50, n. 5, 2017.

SOHAL, A. S.; SINGH, M. Implementing Advanced Manufacturing technology: facts critical to success. **Logistics Information Management**. v. 5, n. 1, p. 39-46, 1992.

SOUTHARD, P. B.; CHANDRA, C.; KUMAR, S. RFID in healthcare: a Six Sigma DMAIC and simulation case study. **International journal of health care quality assurance**, v. 25, n. 4, p. 291-321, 2012.

SUSSKIND, R. E.; SUSSKIND, D. **The future of the professions**: How technology will transform the work of human experts. Oxford University Press, USA, 2015.

ŠURDILOVIĆ, D., BERNHARDT, R.; ZHANG, L. New intelligent power-assist systems based on differential transmission. **Robotica**, v. 21, n. 3, p. 295-302, 2003.

TAGHIZADEGAN, S. **Essentials of lean Six Sigma**. Elsevier Inc., First edition, 2006.

TAMÁS, P.; ILLÉS, B.; DOBOS P. **Waste reduction possibilities for manufacturing systems in the industry 4.0**. 20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference - IManEE, 2016.

TANG, D., ZHENG, K., ZHANG, H., SANG, Z., ZHANG, Z., XU, C., ... ZECHINELLI-MARTINI, J. L. Using autonomous intelligence to build a smart shop floor. **Procedia CIRP**, n. 56, p. 354-359, 2016.

TIRABOSCHI, M.; SEGUEZZI, F. Il piano nazionale indústria 4.0: una lettura lavoristica. **Labour & Law Issues – LLI**. n. 2, v. 2, 2016.

TOFLER, A. **A terceira onda**. 16. ed. Rio de Janeiro: Record, 1980.

TURBAN, E. **Tecnologia da informação para gestão**: em busca do melhor desempenho estratégico e operacional. 8 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

VOSS, C.A., TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M., Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 22, n. 2, p. 195–219, 2002.

WAGNER, T.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. Industry 4.0 impacts on lean production systems. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 125-131, 2017.

WALLACE, E.; RIDDICK, F. **Panel on Enabling Smart Manufacturing**. State College, USA, 2013.

WANG, M.L.; QU, T.; ZHONG, R.Y.; DAI, Q.Y.; ZHANG, X.W.; HE, J. B. (2012). A radio frequency identification-enabled real-time manufacturing execution system for one-of-a-kind production manufacturing: a case study in mould industry. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 1, p. 20-34, 2012.

WEINBERG, B. D.; MILNE, G. R.; ANDONOVA, Y. G.; HAJJAT, F. M. Internet of things: convenience vs. Privacy and secrecy. **Business Horizons**, 2015.

WEISS, A., HUBER, A., MINICHBERGER, J.; IKEDA, M. First Application of Robot Teaching in an Existing Industry 4.0 Environment: Does It Really Work?. **Societies**, v. 6, n.3, p. 20, 2016.

WIELKI, J.; KOZIOL, P. Optimization of business processes with the use of microlocation tools based on the Industry 4.0 concept. **Calitatea**, v. 20, n. S1, p. 469, 2019.

WOMACK, J.P.; JONES, D. T.; ROSS, D. **The Machine that Changed the World**. New York: Macmillan, 1990.

WOMACK, J.P.; JONES, D. T. **Lean Thinking**. New York: Simon & Schuster, 1996.

YANG, T.; WANG, T. K.; LI, V. C.; SU, C. L. The optimization of total laboratory automation by simulation of a pull-strategy. **Journal of medical systems**, v.39, n.1, p. 162, 2015.

YIN, R. K. **Case study research: design and methods**, 4<sup>th</sup> edition. Applied social research methods series, 5. SAGE Publication, Inc., 2009.

ZUEHLKE, D. SmartFactory—Towards a factory-of-things. **Annual reviews in control**, v. 34, n. 1, p. 129-138, 2010.

## APÊNDICE A: PROTOCOLO DE ESTUDO DE CASO

### 1. Apresentação

O presente Protocolo de Estudo de Caso tem como objetivo delinear a pesquisa empírica da tese de doutorado intitulada “*Análise dos pontos de convergência entre as tecnologias da indústria 4.0 práticas Lean Seis Sigma em processos de manufatura: um estudo multicase*”, desenvolvida por Juliano Endrigo Sordan, aluno da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

Os procedimentos para a coleta e análise dos dados são explicados com o propósito de assegurar a confiabilidade e a validade da pesquisa. A participação dos entrevistados é de fundamental importância para se compreender as possibilidades de aplicação das tecnologias digitais associadas à Indústria 4.0 no âmbito das práticas Lean Seis Sigma, assim como para validar a estrutura de análise da pesquisa proposta.

Para assegurar a confidencialidade das informações obtidas, o nome das organizações participantes e dos entrevistados não serão identificados nesta pesquisa, podendo ser substituídos por outras denominações, tais como “Empresa A”, “supervisor industrial”, entre outras. Além disso, o resultado da pesquisa em cada organização será estruturado em um relatório final, que será entregue à cada empresa participante com o intuito de obter a autorização para a publicação do estudo.

Componente da Pesquisa	Detalhamento
Questões de Pesquisa	<p>QP1: <i>Quais são os pontos de convergência entre as tecnologias I4.0 e as práticas LSS?</i></p> <p>QP2: <i>Como é possível implementar esses pontos de convergência em processos de manufatura?</i></p> <p>QP3: <i>Quais são os resultados decorrentes dessa integração?</i></p>
Objetivos da Pesquisa	<p><b>Objetivo geral:</b> Analisar os pontos de convergência entre tecnologias I4.0 e práticas LSS em processos de manufatura.</p> <p><b>Objetivos específicos:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Investigar o estado da arte sobre os temas “Práticas LSS” e “I4.0”, a fim de caracterizar esse tipo de interação por meio da identificação dos pontos de convergência entre os dois temas, das suas especificidades e dos resultados decorrentes dessa interação.</li> <li>Desenvolver uma estrutura de análise de pesquisa conceitual para a investigação empírica dessa interação por meio de estudos de caso.</li> <li>Analisar a aderência da estrutura de análise de pesquisa com base nos resultados obtidos nos estudos de caso envolvendo organizações com expertise nas práticas LSS, cujos processos de manufatura forneçam evidências de aplicação de tecnologias I4.0 nessas práticas.</li> </ol>
Critério de seleção das empresas	<p>Os critérios para a seleção das empresas envolvidas na pesquisa incluíram:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>Empresas de médio e grande porte.</b> Até o momento, as empresas de pequeno porte não têm se mostrado preparadas para uma estratégia de conversão para o modelo I4.0 (KAGERMANN <i>et al.</i>, 2013; LEYH <i>et al.</i>, 2016; SCHUMACHER <i>et al.</i>, 2016). Além disso, a implementação de estratégias de excelência operacional de forma sistematizada é evidenciada com maior frequência em grandes empresas.</li> <li><b>Processos de manufatura.</b> Adotou-se como escopo deste estudo a realização da pesquisa em indústrias de manufatura classificadas como processos de transformação (CNAE, Subclasses 2.3, seção C), especificamente relacionadas à indústria automotiva. A razão para a definição deste escopo deu-se pelo nível de aderência às tecnologias I4.0 evidenciados nesse seguimento industrial (HOFMANN; RÜSCH, 2017; RÜBMANN <i>et al.</i>, 2015; LUGERT <i>et al.</i>, 2018; MÜLLER <i>et al.</i>, 2018; POWELL <i>et al.</i>, 2018).</li> <li><b>Práticas de Excelência Operacional.</b> Espera-se que as organizações participantes apresentem um bom nível de maturidade nas práticas LSS. Isso requer uma estrutura mínima incluindo a formação de especialistas (<i>green belts</i>, <i>black belts</i> ou <i>lean practitioners</i>) e a execução de projetos LSS ou eventos <i>kaizen</i> (MONTGOMERY; WOODALL, 2008; CORBETT, 2011; PYSDEK; KELLER, 2011; ISMYRLIS; MOSCHIDIS, 2013). Adotou-se como critério o tempo mínimo de pelo menos 2 anos de experiência contínua na implementação de ações de excelência operacional na forma de projetos ou eventos <i>kaizen</i> nas empresas selecionadas.</li> </ol>

	<p>d) <b>Estratégia de conversão para o modelo I4.0.</b> Observando os 13 PCs fica evidente a necessidade de selecionar casos em que seja possível evidenciar a implementação de pelo menos um ponto de convergência entre práticas LSS e tecnologias I4.0. Sendo assim, optou-se por selecionar empresas cujo nível de maturidade I4.0 pudesse ser caracterizado como “<i>Full-scale adopters</i>”.</p> <p>e) <b>Localização em um raio de 500Km de São Carlos.</b> Este critério foi estabelecido com base na limitação dos recursos (tempo e orçamento) disponíveis para a realização da pesquisa.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Referencial Teórico</b></p>	<p>Os autores mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa incluem:</p> <p><b>Abordagem LSS:</b> Pande <i>et al.</i>, (2000); Eckes (2002); George (2002); Emiliani <i>et al.</i>, (2003); Snee (2004); Arnheiter e Maleyeff (2005); Liker (2005); Bendell (2006); Kumar <i>et al.</i>, (2006); Taghizadegan (2006); Rother e Shook (2007); Montgomery e Woodall (2008); Bass e Lawton (2009); Hirano (2009); Salah <i>et al.</i>, (2010); Snee (2010); Corbett (2011); Mehrjerdi (2011); Oprime <i>et al.</i> (2011); Pysdek e Keller (2011); De Mast e Lokkerbol (2012); Ismyrlis e Moschidis (2013); Andersson <i>et al.</i>, (2014).</p> <p><b>Indústria 4.0:</b> Zuehlke (2010); Davenport e Kim (2013); Kagermann <i>et al.</i>, (2013); Nicoletti (2013); Schmitt <i>et al.</i>, (2013); Wallace e Riddick (2013); Brettel <i>et al.</i>, (2014); Guo <i>et al.</i>, (2014); Hoerl <i>et al.</i>, (2014); Lasi <i>et al.</i>, (2014); Porter e Heppelmann (2014); Kull (2015); Lasota e Shah (2015); Lee e Lee (2015); Marr (2015); O’donovan <i>et al.</i>, (2015); Rüßmann <i>et al.</i>, (2015); Susskind e Susskind (2015); Weinberg <i>et al.</i>, (2015); Bartodziej (2016); Baygin <i>et al.</i>, (2016); Eleftheriadis e Myklebust (2016); Erol <i>et al.</i>, (2016); Gilchrist (2016); Pérez <i>et al.</i>, (2016); Pfeiffer <i>et al.</i>, (2016); Qin <i>et al.</i>, (2016); Romero <i>et al.</i>, (2016); Sanders <i>et al.</i>, (2016); Tang <i>et al.</i>, (2016); Weiss <i>et al.</i>, (2016); Devezas <i>et al.</i>, (2017); Hofmann e Rüsck (2017); Liu e Xu (2017); Ma <i>et al.</i>, (2017); Marques <i>et al.</i>, (2017); Robla-gómez <i>et al.</i>, (2017); Schwab (2017); Wagner <i>et al.</i>, (2017); Carpanzano <i>et al.</i>, (2018); Ervural e Ervural (2018); Esengün e Ince (2018); Lucke <i>et al.</i>, (2008); Salkin <i>et al.</i>, (2018).</p> <p><b>Pontos de Convergência:</b> Hedelind e Jackson (2011); Krammer <i>et al.</i>, (2011); Southard <i>et al.</i>, (2012); Nicoletti (2013); Schmitt <i>et al.</i>, (2013); Bal e Satoglu (2014); Hoerl <i>et al.</i>, (2014); Lee <i>et al.</i>, (2014); Kolberg e Zühlke (2015); Li <i>et al.</i>, (2015); Yang <i>et al.</i>, (2015); Eleftheriadis e Myklebust (2016); Sanders <i>et al.</i>, (2016); Tamás <i>et al.</i>, (2016); Freitas <i>et al.</i>, (2017); Kolberg <i>et al.</i>, (2017); Laux <i>et al.</i>, (2017); Ma <i>et al.</i>, (2017); Mrugalska e Wyrwicka (2017); Neradilova e Fedorko (2017); Rane <i>et al.</i>, (2017); Sanders <i>et al.</i>, (2017); Wagner <i>et al.</i>, (2017); Ante <i>et al.</i>, (2018); Lugert <i>et al.</i>, (2018); Mayr <i>et al.</i>, (2018); Powell <i>et al.</i>, (2018); Romero <i>et al.</i>, (2018); Satoglu <i>et al.</i>, (2018); Sai <i>et al.</i>, (2019); Wielki e Koziol (2019).</p> <p><b>Requisitos técnicos</b></p> <p><b>Requisitos de TI:</b> Lucke <i>et al.</i>, (2008); Zuehlke (2010); Kagermann <i>et al.</i>, (2013); Schmitt <i>et al.</i>, (2013); Brettel <i>et al.</i>, (2014); Guo <i>et al.</i>, (2014); Pessôa e Spínola (2014); Adolphs <i>et al.</i>, (2015); Lee (2015); Rüßmann <i>et al.</i>, (2015); Bartodziej (2016); Qin <i>et al.</i>, (2016); Pfeiffer <i>et al.</i>, (2016); Tang <i>et al.</i>, (2016); Kolberg <i>et al.</i>, (2017); Ma <i>et al.</i>, (2017); Marques <i>et al.</i>, (2017).</p> <p><b>Requisitos de automação:</b> Lucke <i>et al.</i>, (2008); Laudon e Laudon (2010); Zuehlke (2010); Kagermann <i>et al.</i>, (2013); Schmitt <i>et al.</i>, (2013); Wallace e Riddick (2013); Gilchrist (2016); Pérez <i>et al.</i>, (2016); Gonçalves <i>et al.</i>, (2017); Wagner <i>et al.</i>, (2017).</p> <p><b>Requisitos de competências:</b> Rüßmann <i>et al.</i>, (2015); Susskind e Susskind (2015); Baygin <i>et al.</i>, (2016); Eleftheriadis e Myklebust (2016); Erol <i>et al.</i>, (2016); Leyh <i>et al.</i>, (2016); Romero <i>et al.</i>, (2016); Schumacher <i>et al.</i>, (2016).</p> <p><b>Resultados:</b> Womack <i>et al.</i>, (1990); Womack e Jones (1996); Pande <i>et al.</i>, (2000); Eckes (2002); George (2002); Emiliani <i>et al.</i>, (2003); Snee (2004); Arnheiter e Maleyeff (2005); Liker (2005); Bendell (2006); Kumar <i>et al.</i>, (2006); Taghizadegan (2006); Rother e Shook (2007); Montgomery e Woodall (2008); Bass e Lawton (2009); Hirano (2009); Salah <i>et al.</i>, (2010); Snee (2010); Corbett (2011); Mehrjerdi (2011); Oprime <i>et al.</i> (2011); Pysdek e Keller (2011); De Mast e Lokkerbol (2012); Okhovat <i>et al.</i>, (2012); Ismyrlis e Moschidis (2013); Kagermann <i>et al.</i>, (2013); Nicoletti (2013); Andersson <i>et al.</i>, (2014); Lee <i>et al.</i>, (2014); Adolphs <i>et al.</i>, (2015); Rüßmann <i>et al.</i>, (2015); Eleftheriadis e Myklebust (2016); Lande <i>et al.</i>, (2016); Protzman <i>et al.</i>, (2016); Sanders <i>et al.</i>, (2016).</p>

<p><b>Procedimentos para a coleta de dados</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Foco no processo definido para a investigação (processo com maior aderência às tecnologias I4.0).</li> <li>• Fontes primárias de dados: entrevistas semiestruturadas com questões fechadas (<i>mapping questions</i>) e abertas (<i>mining questions</i>), registros de observações <i>in loco</i> e análise de documentos internos (registros de ações LSS, apresentações institucionais, relatórios técnicos e outros registros relacionados à transformação digital na empresa).</li> <li>• Aplicação do roteiro de pesquisa (Apêndice B).</li> <li>• Gravação das entrevistas em arquivo .mp3.</li> <li>• <i>Mapping questions</i> com foco na constatação de aderência à estrutura de análise da pesquisa.</li> <li>• <i>Mining questions</i> para detalhamento das respostas e enriquecimento das evidências.</li> <li>• Número de entrevistados de acordo com a disponibilidade de respondentes e nível de saturação das entrevistas.</li> <li>• O tempo previsto para a entrevista é de aproximadamente 50 minutos.</li> <li>• Serão entrevistados apenas colaboradores que tenham experiência em projetos de excelência operacional (<i>green belts</i>, <i>black belts</i>, <i>master black belts</i>, <i>lean practitioners</i>, <i>champions</i>, gerentes de produção, e profissionais das áreas de tecnologia da informação, gestão de pessoas e/ou automação industrial).</li> </ul>
<p><b>Procedimentos para a análise de dados</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transcrição das gravações por meio de <i>software</i> NVivo e Microsoft Excel.</li> <li>• Codificação axial e aberta.</li> <li>• Análise Intracaso e Intercaso.</li> <li>• Tradução das narrativas registradas nas entrevistas.</li> <li>• Estatística descritiva e verificação dos Índices de Respostas Favoráveis – IRF para testar a <b>validade do constructo</b>.</li> <li>• Verificação da <b>confiabilidade</b> por meio do Alpha de Cronbach.</li> <li>• Elaboração de Mapas Conceituais.</li> <li>• Análise de redes sociais.</li> <li>• Estatística inferencial (teste de hipótese não paramétrico) para testar a <b>validade externa</b>.</li> <li>• Análise de Componentes Principais.</li> <li>• Estabelecimento das proposições de pesquisa.</li> </ul>
<p><b>Relatório de estudo de caso</b></p>	<p>Os relatórios de casos individuais deverão apresentar uma narrativa do processo investigativo, assim como das observações a respeito da aderência à estrutura de análise da pesquisa. O relatório intercasos por sua vez, deverá apresentar uma análise cruzada dos casos para facilitar a comparação das evidências de pesquisa.</p>

## APÊNDICE B: ROTEIRO DE ENTREVISTA

### 1 Introdução

Prezado(a):

Esta entrevista faz parte da pesquisa de doutorado do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. A pesquisa visa compreender as possibilidades de interação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas de excelência operacional (Lean Seis Sigma) no processo de manufatura da organização.

Considerando que o tema desta pesquisa se encontra em fase de desenvolvimento, a sua participação será de grande importância para a realização deste estudo. Para melhor análise dos dados obtidos, solicitamos que a entrevista seja gravada.

No entanto, o pesquisador compromete-se a manter a confidencialidade de todas as informações técnicas coletadas na forma de observação, análise documental e entrevista. Após a análise dos dados e conclusão do estudo, um relatório técnico será fornecido à organização, a fim de compartilhar os conhecimentos adquiridos através deste estudo.

Ressaltamos a confidencialidade de todas as informações obtidas durante a pesquisa. A duração da entrevista é aproximadamente 50 minutos. Após a análise das informações coletadas e conclusão do estudo, um relatório técnico será fornecido à organização.

Agradecemos sua participação!

### 2 Dados do entrevistado

<b>Nome</b>	
<b>Cargo</b>	<b>Tempo de experiência na organização</b>
<b>Nível Educaional / Formação LSS</b>	

3 Dados da empresa/processo	
Razão Social	
Porte	Faturamento
Atividade	Nº de funcionários
Principais Produtos	
Processo mais automatizado na empresa	
4 Cultura LSS e infraestrutura técnica	
Descreva as iniciativas LSS e a estrutura organizacional ( <i>Mapping question</i> )	
<i>Quais iniciativas LSS são adotadas atualmente?</i>	<i>A estrutura organizacional da empresa inclui:</i>
<input type="radio"/> Implementa projetos LSS regularmente	<input type="radio"/> <i>Master Black Belt</i>
<input type="radio"/> Implementa projetos LSS esporadicamente	<input type="radio"/> <i>Black Belt</i>
<input type="radio"/> Eventos <i>kaizen</i> específicos (VSM, 5S, SMED,etc)	<input type="radio"/> <i>Green Belt</i>
<input type="radio"/> Eventos <i>kaizen</i> regulares	<input type="radio"/> Praticante <i>Lean</i> ou <i>Lean Belt</i>
<input type="radio"/> <i>Kaizen</i> diário	<input type="radio"/> Especialista em melhoria contínua
<input type="radio"/> MASP/PDCA	<input type="radio"/> <i>Kaizen Team</i>
<input type="radio"/> Outras: _____	<input type="radio"/> Outros: _____
5 Justificativa para a transformação digital e resultados esperados	
Na sua opinião, por que a empresa têm adotado a estratégia de transformação digital ou conversão para a Indústria I4.0? Quais são os resultados dessa estratégia? ( <i>Mining question</i> )	

## 6 Uso das tecnologias I4.0 na organização

As questões abaixo referem-se ao nível de implementação das tecnologias I4.0 no processo descrito anteriormente. Avalie as sentenças a seguir de acordo com a escala de avaliação.

Questões	(1) Discordo Totalmente	(2) Discordo	(3) Nem concordo, nem discordo	(4) Concordo	(5) Concordo Totalmente
T1. A empresa coleta e analisa uma grande quantidade de dados digitais provenientes da fábrica.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
T2. A empresa possui robôs autônomos ou colaborativos.	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
T3 Simulações são usadas para espelhar o mundo físico e melhorar o processo.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
T4 Informações sobre o processo de fabricação são integradas verticalmente e horizontalmente.	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
T5 A empresa utiliza IIoT para a comunicação em tempo real dos recursos produtivos.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
T6 A empresa garante o acesso e a comunicação segura dos dados gerados nos CPS.	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
T7 Os dados digitais provenientes dos CPS são armazenados em nuvem.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
T8 A empresa utiliza manufatura aditiva para produzir peças e/ou sobressalentes.	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
T9 A empresa utiliza Realidade Aumentada no processo de manufatura.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
T10 A empresa utiliza RFID para a comunicação entre produtos/recursos produtivos.	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
T11 A empresa utiliza AGVs ou drones para promover a logística interna da fábrica.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## 7 Pontos de Convergência presentes no processo investigado

As questões abaixo referem-se aos pontos de convergência entre tecnologias I4.0 e práticas LSS que podem ser evidenciados na empresa. Avalie as sentenças a seguir de acordo com a escala de avaliação.

Questões	(1) Discordo Totalmente	(2) Discordo	(3) Nem concordo, nem discordo	(4) Concordo	(5) Concordo Totalmente
PC1. Mapeamento de processos auxiliado por CPS, <i>Big Data</i> e Simulação.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
PC2. Medição de desempenho por meio de CPS e <i>Big Data Analytics</i> .	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
PC3. QFD auxiliado por <i>Big Data Analytics</i> .	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
PC4. Estudo de capacidade e CEP auxiliado por CPS e <i>Big Data Analytics</i>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
PC5. Monitoramento de máquinas por meio de CPS e <i>Big Data Analytics</i> .	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
PC6. Logística interna auxiliada por CPS e AVG.	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
PC7. Projeto de células de manufatura com auxílio de robótica avançada e CPS.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
PC8. Uso de <i>Data Science</i> para a redução de tempos de <i>setup</i> .	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
PC9. Digitalização do controle de estoques ( <i>e-kanban</i> ).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
PC10. Monitoramento e controle da produção em tempo real.	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
PC11. Controle da qualidade com o auxílio de robótica avançada.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
PC12. <i>Mistake proofing</i> com o auxílio de CPS ou inteligência artificial.	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
PC13. Uso de realidade aumentada para auxiliar atividades operacionais.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

A partir das interações apresentadas acima, peça ao entrevistado que, com base em sua experiência e opinião, descreva detalhadamente como essas interações acontecem na prática. Neste momento da entrevista, as seguintes questões de mineração (**Mining questions**) podem ser usadas:

- ✓ *Você pode me dar um exemplo sobre essa interação?*
- ✓ *Você pode me falar mais sobre as diferenças entre o uso de controles tradicionais e controles digitais?*
- ✓ *Por que a empresa decidiu implementar essa tecnologia?*
- ✓ *O que mudou com a implementação dessas tecnologias?*
- ✓ *Que outra tecnologia você recomendaria para melhorar essa atividade? Porquê isso?*
- ✓ *Quais foram os principais resultados obtidos com essa interação?*

## 8 Requisitos técnicos

As questões abaixo referem-se aos requisitos de tecnologia da informação, automação e competências, necessários para a implementação dos pontos de convergência classificados no item anterior. Responda livremente as questões com base nos roteiros de perguntas para cada categoria de requisitos.

### 8.1 Requisitos de Tecnologia da Informação

- ✓ *Quais são os requisitos de hardware (como dispositivos móveis, tablets, etc.) necessários para implementar essas tecnologias?*
- ✓ *Como os dados estão atualmente armazenados, compartilhados e protegidos (cloud e Cibersegurança)?*
- ✓ *Foi necessário algum tipo de integração de sistemas (SCADA, MÊS, ERP, PLM, CAD etc)?*
- ✓ *Quais são as principais barreiras e resultados decorrentes da implementação desses requisitos?*

### 8.2 Requisitos de automação

- ✓ *Quais são os principais dispositivos usados para capturar informações da máquina, como sensores, RFID etc.?*
- ✓ *Como ocorre a integração de dispositivos, para a conversão dos dados do mundo físico para o mundo virtual, incluindo CAD, RFID, PLC etc.?*
- ✓ *Como os dados são transmitidos e acessados no sistema. Exemplos: IoT, wireless, bluetooth, protocolos etc.?*
- ✓ *Que tipo de informações são geradas a partir dessa automação (tempo de ciclo, falhas etc.)?*

Indique o nível atual de automação do processo analisado, de acordo com os 5 níveis abaixo:

- I. Conexão:** Somente uso de sensores, controladores e dispositivos para coletar dados do mundo físico e monitorar o status de máquinas e processos.
- II. Controle:** Os dados coletados do mundo físico são convertidos em informações úteis para controlar o processo de forma autônoma.
- III. Rede:** Os dados coletados do mundo físico abrangem todas as máquinas e são centralizados em uma rede para comparar o desempenho dessas máquinas e usar o histórico de dados para prever problemas futuros.
- IV. Otimização:** Algoritmos e IA são usados para gerar conhecimento sobre o processo e estabelecer relações de causa e efeito e fornecer recomendações para tomada de decisão e falhas potenciais.
- V. Autonomia:** O sistema tem autonomia e capacidade de auto-configuração para evitar falhas e defeitos. O conhecimento sobre o processo está disponível em tempo real.

### 8.3 Requisitos de competências

- ✓ *Quais são os principais requisitos de competências (específicos para o uso das tecnologias I4.0) para o pessoal que executa as atividades no chão de fábrica e/ou implementa práticas LSS?*
- ✓ *Quais ações são ou serão implementadas para desenvolver essas competências?*
- ✓ *Como os requisitos para interface H2M (incluindo segurança no trabalho) são identificados? Os operadores utilizam algum tipo de tecnologia acoplada ao corpo (realidade aumentada, exoesqueleto, sensores etc.)?*
- ✓ *Os operadores recebem treinamento sobre como usar as tecnologias da I4.0 para resolver problemas e melhorar o processo? Explique.*

**APÊNDICE C: DADOS USADOS NA ACP**

<b>PCs</b>	<b>IRFA</b>	<b>IRFB</b>	<b>PR</b>	<b>PA</b>	<b>PN</b>
PC1	0,020280813	0,334991751	0,679071549	0,62386382	0,679555775
PC2	1,32973313	1,50566185	1,04690197	0,987161174	1,04652806
PC3	-1,55135532	0,725215116	-0,79225014	-0,819091867	-0,791496923
PC4	0,0202808137	1,05300274	0,127325915	0,62386382	0,127515569
PC5	0,019914123	-0,44545498	-0,240504507	-0,276704268	-0,241038494
PC6	0,805732188	-1,22590171	-0,240504507	-0,276704268	-0,241038494
PC7	-0,241536311	-1,22590171	-0,424419718	-0,460911377	-0,424524637
PC8	-1,28953819	-0,44545498	-1,16008056	-1,18238922	-1,16005099
PC9	1,32973313	0,725215116	0,311241126	0,26568333	0,311001712
PC10	1,067916	0,725215116	0,86298676	0,808070929	0,863041918
PC11	-0,765537251	-1,22590171	-1,16008056	-1,18238922	-1,16005099
PC12	0,543915063	-1,22590171	2,15039324	2,07193637	2,15060847
PC13	-1,28953819	0,725215116	-1,16008056	-1,18238922	-1,16005099

Nota: PCs - Pontos de convergência; IRFA – Índice de Respostas Favoráveis na Empresa A; IRFB – Índice de Respostas Favoráveis na Empresa B; PPC – Peso Identificado na Rede Social; PA – Proporção da Aresta; PN – Proporção do Nó.