

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0:
PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA PRIORIZAÇÃO CONSIDERANDO
O GRAU DE MATURIDADE *LEAN***

PIRACICABA

2022

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0:
PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA PRIORIZAÇÃO CONSIDERANDO
O GRAU DE MATURIDADE *LEAN***

DIÓGENES MARCELO CASSIANO CORIGUAZI

ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE TADEU SIMON

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Doutor.

PIRACICABA

2022

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecária: Graziela Cristina Colletti - CRB-8/048/2022.

C798i	<p>Coriguazi, Diógenes Marcelo Cassiano Implementação das tecnologias da indústria 4.0: proposta de um método para priorização considerando o grau de maturidade Lean / Diógenes Marcelo Cassiano Coriguazi – 2022. 214 f. ; 30 cm.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon. Tese (Doutorado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Engenharia de Produção, Piracicaba, 2022.</p> <p>1. Indústria 4.0. 2. Maturidade Lean. 3. Método de Implementação. I. Coriguazi, Diógenes Marcelo Cassiano. II. Título.</p> <p>CDD – 670</p>
-------	---

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me suportado, dado forças e inspirado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Daiane, minha amada esposa, que sempre me apoiou e me deu forças neste período de abnegação e dedicação. Obrigado por abraçar meus sonhos e por me transformar em uma pessoa melhor.

Ao meu filho Marcelo, que é o nosso amor maior. Tudo que fazemos é por você.

Aos meus queridos pais Heráclito e Maria Nilza (em memória), por toda a educação, caráter, amor e pelos ensinamentos de vida. Devo tudo isso a vocês.

Ao Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon, meu amigo e orientador, por toda a dedicação, paciência, resiliência, recomendações e colaborações. Obrigado pelo apoio nos momentos mais difíceis e por toda a confiança.

Aos Professores Dr. André Luis Helleno, Dr. Fernando Celso de Campos, Dr. Moacir Godinho Filho e Dr. Milton Vieira Júnior, membros da banca examinadora de qualificação e defesa, pelas contribuições e sugestões.

Aos professores e amigos do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Unimep, que me instruíram, incentivaram e inspiraram ao longo dessa jornada.

À Universidade Metodista de Piracicaba, pela oportunidade oferecida e pela excelente equipe docente.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu amigo, mentor e exemplo de caráter e honra, Gleison Matana, pelo companheirismo, incentivo, apoio, compreensão e dedicação, ao longo da minha jornada na pós-graduação. Muito obrigado.

Aos familiares, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo entenderam que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

CORIGUAZI, Diógenes M. C. **Implementação das tecnologias da Indústria 4.0: proposta de um método para priorização considerando o grau de maturidade *Lean***. 2021. 213f. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção – Universidade Metodista de Piracicaba.

RESUMO

A Indústria 4.0 vem sendo amplamente debatida na indústria e na academia. Embora as pesquisas na área estejam crescendo exponencialmente, evidências da implementação da Indústria 4.0 na prática ainda são escassas, dificultando a compreensão de como as empresas o fazem. Adicionalmente, os desafios que a indústria enfrenta ao implementar o conceito parecem ser ainda menos abordados. A implementação de tecnologias da Indústria 4.0 é tarefa complexa e se torna ainda mais desafiadora sem uma abordagem padronizada. Tal complexidade e as incertezas quanto aos requisitos tecnológicos, benefícios e impactos organizacionais tornam difíceis as decisões sobre investimentos. O *Lean* vem sendo apontado como fator crítico de sucesso para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Pesquisas mostram que a implementação bem-sucedida da Indústria 4.0 está fortemente relacionada ao nível de maturidade do *Lean*, sugerindo que as empresas podem obter seus benefícios, no menor tempo, ao estabelecerem um plano de implementação priorizando as tecnologias vinculadas às práticas *Lean* com maior grau de maturidade. Até onde se pôde pesquisar, não foram encontrados, na literatura, procedimentos com esse intento. Este trabalho tem o objetivo de propor um método para definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade *Lean*. O método é constituído de um roteiro para avaliação do grau de maturidade *Lean* e uma ferramenta para processamento das informações que consideram as interações entre práticas *Lean* e tecnologias da Indústria 4.0. A proposta mostrou-se adequada em quatro aplicações realizadas em empresas de manufatura, pois além de fornecer uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0, demonstrou ser de fácil execução. Houve boa receptividade e baixa resistência por parte dos profissionais das empresas que participaram do processo, pois apesar de contemplar novas tecnologias, é suportado pelo *Lean*, estratégia já difundida e consolidada. É um dos primeiros métodos a apoiar empresas no desenvolvimento de um plano de implementação da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade *Lean*. O trabalho contribui para o desenvolvimento da teoria na medida em que identifica e reúne com ampla abrangência e de maneira estruturada, as correlações entre as práticas *Lean* e tecnologias da Indústria 4.0, os benefícios do *Lean* para a Indústria 4.0 e da Indústria 4.0 para o *Lean*. Como contribuição para a prática, o método fornece uma abordagem padronizada para o desenvolvimento de um plano de implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria 4.0, Maturidade *Lean*, Método de Implementação, Rede Neural Artificial

CORIGUAZI, Diógenes M. C. **Implementation of Industry 4.0 technologies: proposal of a prioritization method considering the Lean maturity degree**. 2021. 213f. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção – Universidade Metodista de Piracicaba.

ABSTRACT

Industry 4.0 has been widely debated in industry and academia. Although research in the area is growing exponentially, evidence of the Industry 4.0 implementation in practice is still scarce, making it difficult to understand how companies do it. Additionally, the challenges the industry faces in implementing the concept seem to be even less addressed. Implementing Industry 4.0 technologies is a complex task and becomes even more challenging without a standardized approach. Such complexity and uncertainties regarding technological requirements, benefits and organizational impacts make investment decisions difficult. Lean has been identified as a critical success factor for the implementation of Industry 4.0 technologies. Research shows that the successful implementation of Industry 4.0 is strongly related to the Lean maturity degree, suggesting that companies can obtain their benefits, in the shortest time, by establishing an implementation plan prioritizing technologies linked to Lean practices to a greater maturity degree. As far as it could be researched, no procedures were found in the literature for this purpose. This thesis aims to propose a method to define a priority order for the implementation of Industry 4.0 technologies considering the Lean maturity degree. The method consists of a roadmap for assessing the Lean maturity degree and a tool for processing information that considers the interactions between Lean practices and Industry 4.0 technologies. The proposal proved to be adequate in four applications carried out in manufacturing companies, as in addition to providing a priority order for the implementation of Industry 4.0 technologies, it proved to be easy to execute. There was good receptivity and low resistance from the professionals of the companies that participated in the process, because despite contemplating new technologies, it is supported by Lean, a strategy that is already widespread and consolidated. It is one of the first methods to support companies in developing an Industry 4.0 implementation plan considering the Lean maturity degree. The research contributes to the theory development as it identifies and brings together, in a broad and structured way, the correlations between Lean practices and Industry 4.0 technologies, the benefits of Lean for Industry 4.0 and Industry 4.0 for Lean. As a contribution to practice, the method provides a standardized approach to developing an implementation plan for Industry 4.0 technologies.

KEYWORDS: *Industry 4.0, Lean Maturity, Implementation Method, Artificial Neural Network.*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2.	OBJETIVO DO TRABALHO.....	8
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	11
2.1.	INDÚSTRIA 4.0	11
2.1.1.	TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0.....	15
2.1.2.	BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0	22
2.2.	PRINCÍPIOS E PRÁTICAS DA FILOSOFIA <i>LEAN</i>	26
2.3.	INTERAÇÕES ENTRE O <i>LEAN</i> E AS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	36
2.4.	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DO <i>LEAN</i>	69
3.	MÉTODO DE PESQUISA	76
3.1.	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	76
3.2.	ABORDAGEM METODOLÓGICA	77
3.2.1.	PROCEDIMENTOS DE PESQUISA	78
3.2.1.1	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	78
3.2.1.2	DESIGN SCIENCE RESEARCH	79
3.2.2.	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	85
3.2.2.1.	MÉTODOS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 CONSIDERANDO O GRAU DE MATURIDADE <i>LEAN</i>	89
4.	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PROPOSTO	91
4.1.	CICLO DE RELEVÂNCIA.....	91
4.1.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA E IDENTIFICAÇÃO DA LACUNA	91
4.1.2.	DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA PESQUISA	93
4.1.3.	DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DO MÉTODO PROPOSTO	95
4.1.4.	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	95
4.2.	CICLO DE RIGOR	96
4.2.1.	IDENTIFICAÇÃO DAS PRÁTICAS <i>LEAN</i> E DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	96
4.2.2.	DEFINIÇÃO DO MÉTODO OU FERRAMENTA PARA MEDIÇÃO DO GRAU DE MATURIDADE DO <i>LEAN</i>	103
4.3.	CICLO DE PROJETO	117
4.3.1.	ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO	117
4.3.1.1	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	117
4.3.1.2	DEFINIÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS	117
4.3.2.	ETAPA DE SUGESTÃO	153
4.3.2.1	DEFINIÇÃO DAS AMPLITUDES DAS VARIÁVEIS E ESCALA DE MEDIÇÃO.....	153
4.3.2.2	SELEÇÃO DA FERRAMENTA DE PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES	154
4.3.3.	ETAPA DE DESENVOLVIMENTO	157
4.3.3.1	DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	157
4.3.4.	ETAPA DE AVALIAÇÃO.....	161
4.3.4.1	CODIFICAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO MATEMÁTICO	161
4.3.4.2	EXPERIMENTAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL	163
4.3.5.	ETAPA DE FINALIZAÇÃO	165
5.	APLICAÇÕES DE ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	168
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS EMPRESAS.....	168
5.2.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	169
5.2.1.	APLICAÇÃO NA EMPRESA 1	170
5.2.2.	APLICAÇÃO NA EMPRESA 2	173
5.2.3.	APLICAÇÃO NA EMPRESA 3	175

5.2.4.	APLICAÇÃO NA EMPRESA 4	178
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	181
7.	CONCLUSÕES.....	183
7.1.	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	184
7.2.	LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	185
7.3.	TRABALHOS FUTUROS	185
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	186
	APÊNDICE.....	200

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESTRUTURA DO TRABALHO.....	10
FIGURA 2 – PRINCÍPIOS DE CONCEPÇÃO E TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR GHOBAKHLOO (2018).....	13
FIGURA 3 – TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR GEISSBAUER <i>ET AL.</i> (2016).....	16
FIGURA 4 – TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR KÜPPER (2019).....	18
FIGURA 5 – TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR FRANK <i>ET AL.</i> (2019).....	19
FIGURA 6 – DRIVERS DE VALOR DA INDÚSTRIA 4.0 POR CAYLAR <i>ET AL.</i> (2016).....	22
FIGURA 7 – A CASA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO TOYOTA POR LIKER E MORGAN (2006).....	29
FIGURA 8 – BENEFÍCIOS DA IMPLANTAÇÃO DAS TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA 4.0 NO <i>LEAN</i> POR LAAPER E KIEFER (2020)	57
FIGURA 9 – GRUPOS BÁSICOS E PROCESSOS EMPRESARIAIS DA LESAT POR MIT (2001).....	71
FIGURA 10 – DEFINIÇÕES DO NÍVEL DE CAPACIDADE GENÉRICA DA LESAT POR MIT (2001)	73
FIGURA 11 – ROTEIRO DE TRANSIÇÃO PARA O <i>LEAN</i> POR MIT (2001).....	73
FIGURA 12 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA E PROCEDIMENTOS ADOTADOS.....	76
FIGURA 13 – ETAPAS DA ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	77
FIGURA 14 – ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA POR LEVY E ELLIS, (2006)	78
FIGURA 15 – CICLOS DO <i>DESIGN SCIENCE RESEARCH</i> POR HEVNER (2007)	82
FIGURA 16 – ETAPAS DO <i>DESIGN SCIENCE RESEARCH</i> POR MANSON (2006).....	83
FIGURA 17 – ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	88
FIGURA 18 – ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA REFERENTE À IDENTIFICAÇÃO DE MÉTODOS QUE DEFINAM UMA ORDEM DE PRIORIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	90
FIGURA 19 – ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA REFERENTE AOS RISCOS, DESAFIOS OU OPORTUNIDADES NA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0	92
FIGURA 20 – REQUISITOS E CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	96
FIGURA 21 – ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA REFERENTE AO <i>LEAN</i> COMO FILOSOFIA DE APOIO NA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0	97
FIGURA 22 – ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA REFERENTE ÀS INTERAÇÕES ESPECÍFICAS DO <i>LEAN</i> COM A INDÚSTRIA 4.0.....	99
FIGURA 23 – TOTAL DE DOCUMENTOS QUE IDENTIFICAM A INTERAÇÃO OU RELAÇÃO ENTRE AS PRÁTICAS <i>LEAN</i> E AS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	100
FIGURA 24 – ELEMENTOS TECNOLÓGICOS E AS TECNOLOGIAS DE APOIO DA INDÚSTRIA 4.0 POR ACATECH (2020); GEISSBAUER <i>ET AL.</i> (2016); GHOBAKHLOO (2018) E KÜPPER (2019)	103

FIGURA 25 – NEURÔNIO ARTIFICIAL POR HAYKIN (1999)	155
FIGURA 26 – ARQUITETURAS DA RNA POR HAYKIN (2009)	156
FIGURA 27 – RNA DE ARQUITETURA MLP COMO FERRAMENTA COMBINACIONAL DE PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES	157
FIGURA 28 – FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO TANGENTE HIPERBÓLICA	159
FIGURA 29 – MODELO MATEMÁTICO	160
FIGURA 30 – PROPRIEDADES DA MLP NO MATLAB	162
FIGURA 31 – CÓDIGO COMPUTACIONAL DO MODELO MATEMÁTICO	162
FIGURA 32 – FERRAMENTA DE PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES	165
FIGURA 33 – PASSOS PARA A APLICAÇÃO DO MÉTODO	166
FIGURA 34 – AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DA LEAN E PRIORIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: FABRICANTE DE TRATORES	171
FIGURA 35 – ORDEM DE PRIORIDADE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: FABRICANTE DE TRATORES	171
FIGURA 36 – AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DA LEAN E PRIORIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: FABRICANTE DE GRUPOS GERADORES	174
FIGURA 37 – ORDEM DE PRIORIDADE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: FABRICANTE DE GRUPOS GERADORES	174
FIGURA 38 – AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DA LEAN E PRIORIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: FABRICANTE DE MOTORES	176
FIGURA 39 – ORDEM DE PRIORIDADE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: FABRICANTE DE MOTORES	177
FIGURA 40 – AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DA LEAN E PRIORIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: FABRICANTE DE LOCOMOTIVAS	179
FIGURA 41 – ORDEM DE PRIORIDADE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: FABRICANTE DE LOCOMOTIVAS	180

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – DEFINIÇÕES DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	20
QUADRO 2 – PRINCÍPIOS DO LEAN POR WOMACK E JONES (1997)	30
QUADRO 3 – PRÁTICAS LEAN POR SHAH E WARD, 2003	31
QUADRO 4 – PRÁTICAS LEAN POR BORTOLOTTI ET AL., 2015	32
QUADRO 5 – PRINCÍPIOS E PRÁTICAS LEAN POR BASKARAN E LAKSHMANAN, 2019	32
QUADRO 6 – DESAFIOS DOS PROCESSOS PRODUTIVOS QUE PODEM SER RESOLVIDOS PELO LEAN E/OU INDÚSTRIA 4.0 POR PRINZ ET AL. (2018).....	37
QUADRO 7 – INTER-RELAÇÃO ENTRE O LEAN E A INDÚSTRIA 4.0 POR ROSSINI ET AL. (2019)	45
QUADRO 8 – COMBINAÇÃO DO LEAN COM A INDÚSTRIA 4.0 POR MAYR ET AL. (2018).....	46
QUADRO 9 – OS EFEITOS HABILITADORES DO LEAN SOBRE A INDÚSTRIA 4.0 POR CIANO ET AL. (2021).....	46
QUADRO 10 – LEAN COMO BASE DAS FERRAMENTAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR LAAPER E KIEFER (2020).....	55
QUADRO 11 – COMO O LEAN DIGITAL PODE MELHORAR O LEAN TRADICIONAL NA REDUÇÃO DE DESPERDÍCIOS POR LAAPER E KIEFER (2020).....	56
QUADRO 12 – FUNCIONALIDADES HABILITADORAS DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR POWELL ET AL. (2018)	58
QUADRO 13 – MATRIZ DE IMPACTO OU RELAÇÃO ENTRE OS PRINCÍPIOS DO LEAN E AS TECNOLOGIAS E PRINCÍPIOS DE CONCEPÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 POR WAGNER ET AL. (2017)	63
QUADRO 14 – MATRIZ DE RELAÇÃO ENTRE O LEAN E A INDÚSTRIA 4.0 POR SHAHIN ET AL. (2020)	64
QUADRO 15 – ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE O LEAN E A INDÚSTRIA 4.0 POR VALAMEDE ET AL. (2020).....	64
QUADRO 16 – PRÁTICAS AVALIADAS PELA LESAT POR MIT (2001)	72
QUADRO 17 – TIPOS DE ARTEFATOS POR MARCH E SMITH (1995) E MANSON (2006).....	81
QUADRO 18 – FORMAS DE REALIZAÇÃO DA ETAPA DE AVALIAÇÃO POR HEVNER ET AL. (2004)	85
QUADRO 19 – RELAÇÃO ENTRE AS PRÁTICAS LEAN E AS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	101
QUADRO 20 – AUTORES QUE INDICAM A RELAÇÃO ENTRE AS PRÁTICAS LEAN E AS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	102
QUADRO 21 – RELAÇÃO ENTRE O LEAN E AS PRÁTICAS DA LESAT	104
QUADRO 22 – PRÁTICAS DA LESAT PARA AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DO LEAN ..	111
QUADRO 23 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE O VSM E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	119
QUADRO 24 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE O ELIMINAÇÃO DE DESPERDÍCIOS E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	124

QUADRO 25 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE A MELHORIA CONTÍNUA E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	129
QUADRO 26 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE JIT/JIS E <i>KANBAN</i> E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	131
QUADRO 27 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE GESTÃO À VISTA E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	137
QUADRO 28 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE O FLUXO CONTÍNUO E OS CPS	138
QUADRO 29 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE A TPM E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	139
QUADRO 30 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE O <i>JIDOKA</i> E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	142
QUADRO 31 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE A PADRONIZAÇÃO E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	143
QUADRO 32 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE A GESTÃO DE PESSOAS E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	144
QUADRO 33 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE O POKA-YOKE E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	146
QUADRO 34 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE O <i>HEIJUNKA</i> E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	148
QUADRO 35 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE O SMED E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	149
QUADRO 36 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE A INTEGRAÇÃO COM FORNECEDORES E AS TECNOLOGIAS DA I4.0.....	151
QUADRO 37 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE O <i>GEMBA</i> E AS TECNOLOGIAS DA I4.0	152
QUADRO 38 – RELAÇÕES E BENEFÍCIOS ENTRE A INTEGRAÇÃO COM CLIENTES E AS TECNOLOGIAS DA I4.0.....	152
QUADRO 39 – MATRIZ DE AMOSTRAS PARA TREINAMENTO DA MLP	161
QUADRO 40 – MATRIZ DE PESOS (<i>W_E</i>) E VETOR DE BIAS (<i>B_E</i>) DA CAMADA ESCONDIDA.....	163
QUADRO 41 – MATRIZ DE PESOS (<i>W_S</i>) E VETOR DE BIAS (<i>B_S</i>) DA CAMADA DE SAÍDA.....	164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AGV – *Automated Guided Vehicle* (Veículos Guiados Automaticamente)
- BP – *Backpropagation* (Retropropagação)
- CEO – *Chief Executive Officer* (Diretor Executivo)
- CPS – *Cyber-Physical Systems* (Sistemas Físico-Cibernéticos)
- I4.0 – Indústria 4.0
- ICT – *Information and Communication Technologies* (Tecnologias da Informação e Comunicação)
- IoD – *Internet of Data* (Internet de Dados)
- IoE – *Internet of Everything* (Internet de Tudo)
- IoP – *Internet of People* (Internet das Pessoas)
- IoS – *Internet of Services* (Internet de Serviços)
- IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas)
- JIS – *Just-In-Sequence*
- JIT – *Just-In-Time*
- KPI – *Key Process Indicator* (Indicador Chave de Processo)
- LESAT – *Lean Enterprise Self-Assessment Tool* (Ferramenta de autoavaliação da empresa Lean)
- MAAS - *Manufacturing as a Service* (Manufatura Como um Serviço)
- MIT - *Massachusetts Institute of Technology* (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)
- MLP – *Multi-Layer Perceptron* (Perceptron de Várias Camadas)
- OEE – *Overall Equipment Effectiveness* (Eficiência Global do Equipamento)
- PAAS – *Platform as a Service* (Plataforma como um Serviço)
- PDCA – *Plan, Do, Check and Act* (Planejar, Fazer, Analisar e Agir)
- PIB – Produto Interno Bruto
- PWC – PricewaterhouseCoopers
- RFID – *Radio-Frequency Identification* (Identificação por Rádio Frequência)
- RNA – Rede Neural Artificial
- RSL – Revisão Sistemática da Literatura

SAE – *Society for Automotive Engineers* (Sociedade de Engenheiros Automotivos)

SMED – *Single Minute Exchange of Die* (Tradução Aproximada: troca rápida de ferramentas)

TI – Tecnologia da Informação

TPM – *Total Productive Maintenance* (Manutenção Produtiva Total)

VSM – *Value Stream Mapping* (Mapeamento do Fluxo de Valor)

WIP – *Work-In-Process* (Trabalho em Processo)

WoT – *Web of Things* (Rede das Coisas)

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo inicial apresenta uma visão geral do avanço da Indústria 4.0 nas empresas, bem como seus benefícios e os desafios na implementação do conceito. Destaca, ainda, as interações entre a Indústria 4.0 e a filosofia *Lean* e quais os riscos em se implementar as tecnologias da Indústria 4.0, sem considerar o grau de maturidade do *Lean*. Apresenta, também, a lacuna a ser explorada, a questão de pesquisa, os objetivos, a delimitação e a estrutura do trabalho.

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O conceito Indústria 4.0 vem sendo amplamente debatido na indústria e na academia, devido aos benefícios que as empresas podem alcançar, baseados no avanço das tecnologias de informação e comunicação. Esse conceito surgiu em 2011, com o objetivo estratégico de melhorar a cadeia de valor, organizando e controlando os processos e redes, criando um novo modelo de negócio e adaptando as empresas aos novos formatos de competitividade, por meio da implementação de tecnologias, como os Sistemas Físico-cibernéticos, Internet das Coisas, Objetos Inteligentes e Big Data, entre outras (ANDERL, 2015; LASI *et al.*, 2014). Tecnologias recentes, como o 5G/6G e computadores quânticos, também já aparecem como o próximo passo das tendências tecnológicas da Indústria 4.0 (SIGOV *et al.*, 2022).

A implementação dessas tecnologias já está no escopo das empresas que pretendem permanecer competitivas no cenário global. Em uma pesquisa realizada pela PWC, em 2018, observou-se que os benefícios esperados com a implementação dessas tecnologias eram de 14% de aumento do PIB global, que equivalem a quinze trilhões de dólares, até 2030, um aumento da receita das empresas entre 9% e 22% e um ganho de eficiência entre 9% e 17% (PWC, 2018).

A conectividade e a integração contínua de tecnologias digitais (digitalização), têm levado a mudanças fundamentais em vários modelos de negócio, remodelando a forma como que as empresas constroem a vantagem competitiva, afetando a maneira como abordam os mercados e como derivam suas estratégias (BROSIG *et al.*, 2020). Em 2017, constatou-se que 58% das empresas alemãs já possuíam um elevado nível de digitalização, por meio da inclusão das tecnologias da Indústria 4.0, em suas estratégias (FMEAE, 2018).

A pesquisa acadêmica sobre a Indústria 4.0 vem crescendo exponencialmente, no entanto, as evidências da implementação na prática ainda são escassas. Além disso, os desafios que a indústria enfrenta ao implementar o conceito da Indústria 4.0 parecem ser ainda menos abordados (BAJIC *et al.*, 2021). Em uma análise realizada por Bajic *et al.* (2021), os autores classificam essas preocupações da Indústria 4.0 em dois grupos. O primeiro grupo, chamado de desafios gerenciais, abrange temas como falta de recursos financeiros, falta de mão de obra qualificada, falta de apoio da liderança e segurança cibernética para gestão e compartilhamento de dados. O segundo grupo, chamado de desafios na implementação das tecnologias, trata dos desafios presentes na implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como incompatibilidade entre as tecnologias, dificuldade na gestão e tratamento dos dados e dificuldade no desenvolvimento de algoritmos.

Segundo Butt (2020a), a falta de uma abordagem padronizada na implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como por exemplo, nos sistemas de segurança cibernética, sistemas físico-cibernéticos, na extração e análise de dados (Big Data) e na conectividade entre sistemas, pode ser um desafio no processo de implementação dessas tecnologias, tornando-se uma limitante para que se alcance os seus benefícios em sua integralidade.

Ghadimi *et al.* (2022), comentam que a padronização é um elemento importante no processo de implementação das tecnologias da Indústria 4.0, pois permite o compartilhamento de dados de forma segura e confiável entre os parceiros de negócios, facilita a comunicação entre sistemas e favorece a integração entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as tecnologias existentes nas empresas.

Além da complexidade e dos desafios da Indústria 4.0, Pfohl *et al.* (2015), Rüttiman e Stöckli (2016) relatam que há também as incertezas por parte das empresas em relação aos benefícios do conceito, principalmente no que se refere ao tempo para alcançá-los e no montante financeiro a ser investido. Rüttiman e Stöckli (2016) e Elhusseiny e Crispim (2022) comentam, ainda, que principalmente empresas de pequeno e médio porte podem apresentar maiores dificuldades em alcançar esses benefícios, devido às incertezas organizacionais, técnicas e legais relacionadas à implementação das tecnologias da Indústria 4.0, fazendo com que esses benefícios não ocorram no prazo planejado.

Na realidade a implementação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 é uma tarefa difícil e se torna ainda mais desafiadora quando não é feita sob orientação estruturada (BUTT, 2020b).

O *Lean* vem sendo apontado como fator crítico de sucesso para a implementação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, juntamente com outras estratégias, como a competição baseada na qualidade e flexibilidade, liderança da alta direção, estabelecimento de equipes interfuncionais, condução de atividades preparatórias, planejamento de projetos e atividades de treinamento (POZZI, ROSSI & SECCHI, 2021).

A interação do conceito Indústria 4.0 com processos ou filosofias já implementadas, como é o caso do *Lean*, vem sendo bastante discutida, pois muitas empresas já possuem essa filosofia implementada ou em fase de implementação (GLASS *et al.*, 2016; STAUFEN AG, 2016; DOMBROWSKI, 2017).

Mayr *et al.* (2018) comentam que essa combinação da filosofia *Lean* com as tecnologias da Indústria 4.0 resulta no conceito *Lean 4.0*. Para os autores, essa nova perspectiva do *Lean 4.0* pode ser atribuída a semelhanças em relação as metas da filosofia *Lean* e da Indústria 4.0, como a redução da complexidade, pilares centrais para a suas implementações e a utilização de práticas *Lean* como apoio nessas implementações.

Dessa forma, a influência do *Lean* no processo de implementação do conceito Indústria 4.0 tem sido abordada com frequência cada vez maior, e para muitos autores, o *Lean* pode ser considerado um pré-requisito, ou uma filosofia de apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0. A transparência, robustez e a padronização do *Lean* são características fundamentais (ou base) para a implementação da Indústria 4.0, pois essas características auxiliam na redução da complexidade dos processos e produtos, facilitando a digitalização (LORENZ *et al.*, 2019).

Para Slim *et al.* (2018), a introdução da Indústria 4.0, em empresas com o *Lean* já implementado, permite o desenvolvimento de um sistema de produção mais ágil, flexível, capaz de produzir uma variedade de produtos, sem a necessidade de grandes alterações, que se adapta rapidamente a uma demanda em mudança, reconfigurável e que pode ser ajustado rapidamente para introdução de novos produtos.

Kolberg e Zühlke (2015), relatam que o *Lean* pode formar a base para a implementação da Indústria 4.0, auxiliando no processo de escolha da tecnologia e permitindo que a implementação ocorra de maneira estruturada. Os autores citam também que, a partir de um processo padronizado e enxuto, pode-se analisar quais áreas da empresa devem priorizar a adoção dessas tecnologias, para avançar na melhoria contínua. Adicionalmente, Erro-Garcés (2019) cita que o *Lean*, como uma ferramenta estratégica, auxilia na mudança dos valores culturais de uma empresa, bem como na melhoria da maneira como seu trabalho é realizado e, nesse contexto, ele pode apoiar a implementação da Indústria 4.0.

Sanders *et al.* (2017) mencionam que as práticas *Lean*, como SMED (*Single Minute Exchange of Die*), VSM (*Value Stream Mapping*), Padronização e Eliminação dos Desperdícios, podem apoiar a implementação do conceito Indústria 4.0, pois todos os dispositivos dos Sistemas Físico-Cibernéticos, em uma fábrica inteligente, devem ter um protocolo padrão para comunicação. O SMED auxilia na meta da Indústria 4.0 de tamanhos de lote reduzidos para atingir um tamanho de lote unitário, reduzindo o tempo de configuração. Os dados do VSM podem ser armazenados na nuvem (*cloud computing*) e as máquinas os

acessam continuamente por meio da Internet das Coisas. Em relação à Eliminação de Desperdícios é essencial que a maioria desses desperdícios seja removida, antes da implementação das tecnologias da Indústria 4.0, para que não ocorra a sua digitalização.

Mayr *et al.* (2018), comentam que existem riscos e desafios em implementar as tecnologias da Indústria 4.0 sem considerar o nível de maturidade, ou a implementação eficaz do *Lean*. Para os autores, a falta de princípios e práticas *Lean*, como padronização, transparência, reprodutibilidade e o preparo das pessoas, pode se tornar um risco para essa implementação, pois desperdícios continuariam acontecendo. Os autores citam ainda que a não utilização dos princípios e práticas *Lean*, na gestão da complexidade de produtos e processos, pode reduzir ou atrasar os benefícios financeiros inerentes à introdução das tecnologias da Indústria 4.0.

Tortorella *et al.* (2019) afirmam que a pura adoção das tecnologias da Indústria 4.0 pode não levar aos resultados esperados e as práticas *Lean* ajudariam a desenvolver hábitos e mentalidades organizacionais que favoreceriam as melhorias sistêmicas do processo. Os autores relatam que a aplicação das práticas *Lean* auxilia no aperfeiçoamento da cadeia de valor, possibilitando que as tecnologias da Indústria 4.0 alcancem resultados melhores, em seu processo de implementação.

Observa-se também que existem dificuldades na implementação da Indústria 4.0, que poderiam ser mitigadas pelas práticas *Lean*, como a falta de competências, habilidades e *Know-how* da mão de obra, falta de cooperação entre os departamentos, falta de suporte por parte da alta liderança e dificuldades culturais, falta de uma estratégia e objetivo para a implementação do conceito, falta de aceitação por parte dos empregados, falta de padronização, ou procedimentos em relação ao compartilhamento dos dados entre as empresas e também em relação à fonte, formato, e armazenamento dos dados, dificuldade de coordenação entre as unidades de negócio da empresa e clareza nos possíveis benefícios relativos ao investimento necessário (LUTHRA e MANGLA, 2018; MÜLLER, 2019; HORVÁTH e SZABÓ, 2019).

Küpper *et al.* (2017) citam que a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 pode trazer de 15% a 20% de reduções de custos. Porém, quando essas tecnologias são implementadas em organizações que já possuem as práticas *Lean*, os resultados operacionais são melhores, permitindo, por exemplo, 40% de redução nesses custos operacionais, redução de 20% nos custos associados a baixa qualidade e 30% de redução nos custos de inventário.

Tortorella *et al.* (2018) identificam uma relação entre os princípios do *Lean* e a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, sugerindo que as empresas que implementam tais princípios apresentam menor dificuldade na adoção das tecnologias da Indústria 4.0. No geral, as evidências apresentadas mostram que as tecnologias da Indústria 4.0 estão associadas ao nível de implementação dos princípios do *Lean*. Assim, infere-se que as empresas que possuem esses princípios bem difundidos, podem ter um maior sucesso na implementação das tecnologias da Indústria 4.0, alcançando melhorias de desempenho operacional mais elevadas.

Haartman *et al.* (2020) observaram que as práticas *Lean* são consideradas habilitadoras para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Os autores indicam que o *Lean* direciona as empresas para processos mais padronizados e transparentes, permitindo a sua combinação com as tecnologias digitais. Ainda destacam que os sistemas digitais tendem a ser sequenciais e específicos, enquanto o *Lean* visa reduzir a complexidade. Portanto, é concebível que as empresas que trabalham com a filosofia *Lean* simplifiquem seus processos, a ponto de se tornar mais fácil selecionar e implementar tecnologias digitais, escolhendo e projetando sistemas digitais mais enxutos.

Dombrowski *et al.* (2017), analisaram os dados de uma pesquisa realizada em empresas alemãs, com o objetivo de avaliar as interdependências entre o *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0. Como resultado, observaram que existem interdependências entre oito tecnologias da Indústria 4.0 e oito práticas *Lean*, identificadas no estudo. Com base nesse resultado, os autores relatam que a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 apresenta relação com as práticas *Lean*, posicionando a filosofia *Lean* como um elemento importante para a

implementação dessas tecnologias. Além disso, essas tecnologias podem ter suas implementações facilitadas quando os processos das empresas apresentam altos níveis de maturidade do *Lean* e, portanto, uma abordagem comum baseada no *Lean* e na Indústria 4.0 é necessária.

Rossini *et al.* (2019), identificaram que os níveis mais altos de adoção das tecnologias da Indústria 4.0 podem ser mais facilmente alcançados quando as práticas *Lean* estão amplamente implementadas. Além disso, observaram que, quando os processos não são projetados de forma robusta e as práticas de melhoria contínua não são estabelecidas, a velocidade das empresas para adotar novas tecnologias pode ser menor.

Zangiacomini *et al.* (2020), verificaram que a adoção das práticas *Lean* antes dos investimentos nessas tecnologias pode ser considerado um passo importante e facilitador, pois sem esse passo, a transformação digital seria mais difícil e prolongada, devido à falta de um conhecimento claro dos processos, proporcionado pelas práticas *Lean*. De acordo com as empresas, o desenvolvimento de um modelo de produção *Lean* pode resultar em maior flexibilidade e eficiência dos negócios, facilitando o caminho da transformação digital.

A partir dessa contextualização, verifica-se que o sucesso na implementação das tecnologias da Indústria 4.0 está fortemente relacionado ao nível de maturidade *Lean* e que suas práticas podem ser consideradas vetores facilitadores no processo de implementação dessas tecnologias. Tais constatações sugerem que, para obter os benefícios esperados no menor tempo, as empresas devem estabelecer um plano de implementação das tecnologias da Indústria 4.0, levando-se em conta as práticas *Lean* que apresentam maior grau de maturidade. Até onde pôde-se pesquisar por meio de uma revisão sistemática da literatura, apresentada na Seção 3.2.2.1 desta tese, não foram encontrados métodos que permitam estabelecer uma priorização para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, baseado nas práticas *Lean*.

Levando-se em conta que as evidências da implementação da Indústria 4.0 na prática ainda são escassas, que ainda não existe uma abordagem padronizada para sua implementação e que os princípios e práticas *Lean* interagem positivamente com as tecnologias da Indústria 4.0, surge a seguinte questão de pesquisa: É possível estabelecer uma ordem sequencial para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 visando obter o maior aproveitamento dos benefícios decorrentes da interação entre essas tecnologias e as práticas *Lean*?

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é propor um método que permita definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Este trabalho tem ainda como objetivos específicos:

- Identificar e compreender as relações entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas *Lean*.
- Selecionar um método que meça o grau de maturidade do *Lean*.
- Selecionar uma ferramenta de processamento das informações, para inserção das relações entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas *Lean* e definição de uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

Como resultado, espera-se que este estudo:

- Oriente as empresas de manufatura sobre a importância da adoção das práticas *Lean*, como uma filosofia de apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0;
- Identifique os benefícios de se implementar as tecnologias da Indústria 4.0 em empresas que já possuem o *Lean* com alto grau de maturidade;
- Permita que as empresas identifiquem quais práticas *Lean* devem ser melhoradas, para que as tecnologias da Indústria 4.0 a serem

implementadas possam alcançar resultados operacionais melhores e mais rápidos;

- Permita que as empresas identifiquem quais tecnologias da Indústria 4.0 podem alcançar resultados operacionais melhores e mais rápidos, em áreas ou departamentos que possuam determinadas práticas *Lean* com alto grau de maturidade.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Em sua estrutura (Figura 1), esta tese apresenta no Capítulo 1 a contextualização do tema, expondo os principais assuntos do trabalho, explicando a importância e a justificativa do trabalho, destacando o objetivo geral e delimitando o estudo. No Capítulo 2 tem-se a revisão narrativa da literatura, que aborda a Indústria 4.0 com suas tecnologias habilitadoras e seus benefícios, os princípios e prática da filosofia *Lean* e os métodos de avaliação da maturidade do *Lean*. Tem-se ainda no Capítulo 2 as interações entre o *Lean* e a Indústria 4.0, identificadas por meio das revisões sistemáticas da literatura, detalhadas no Capítulo 3. Já o Capítulo 3 descreve a classificação da pesquisa, a abordagem metodológica, detalhando os procedimentos de pesquisa adotados para a condução do trabalho, apresenta também o desenvolvimento da pesquisa e a busca por métodos de implementação das tecnologias da Indústria 4.0 que consideram o grau de maturidade das práticas *Lean*. No Capítulo 4 tem-se a apresentação do desenvolvimento do método proposto, conforme procedimento metodológico definido no Capítulo 3. No Capítulo 5 tem-se as aplicações de ilustração, contextualizando os resultados encontrados. No Capítulo 6 são apresentados os resultados e discussão. Por fim, no Capítulo 7, tem-se as conclusões, limitações e propostas de trabalhos futuros.

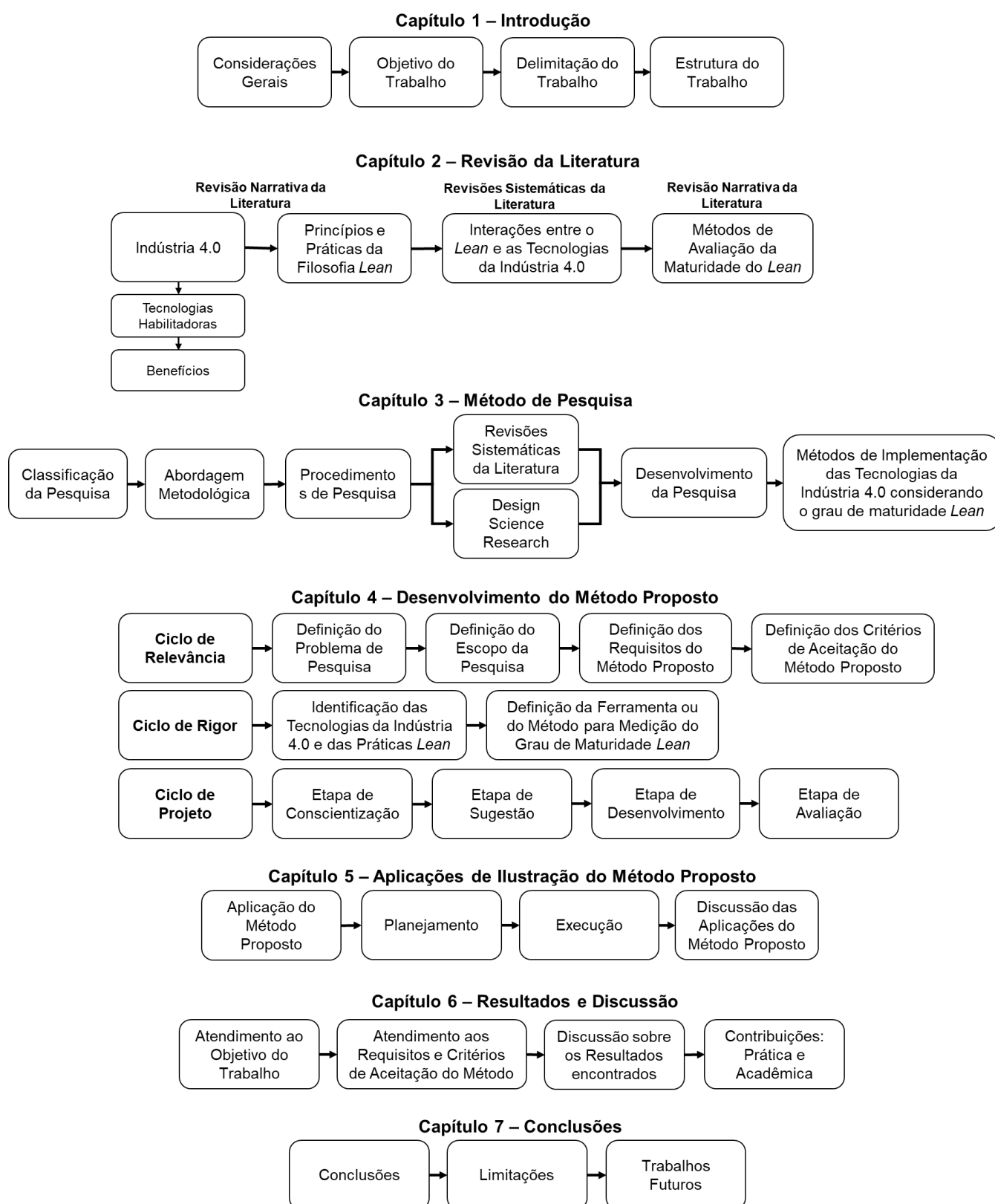


Figura 1 – Estrutura do Trabalho

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta as definições, tecnologias e o avanço do conceito Indústria 4.0, bem como os seus benefícios. Aborda a filosofia *Lean*, com seus princípios e práticas e as influências do *Lean* na implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Apresenta os métodos utilizados para avaliação da maturidade do *Lean*. Faz uma busca por métodos que priorizam a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, com base no grau de maturidade das práticas *Lean*.

2.1. INDÚSTRIA 4.0

Desde a sua primeira aparição na Feira de Hannover, em 2011, a Indústria 4.0 vem avançando por meio de sua implementação nas empresas de todos os portes e em, praticamente, todos os países. A estimativa de investimentos em infraestrutura, em todo o mundo, referente ao conceito é de, aproximadamente, 3,7 trilhões de dólares até o final de 2025 (OKULOWSKA, 2020).

No relatório desenvolvido pela Fortune Business Insights, estima-se que os investimentos globais em tecnologias da Indústria 4.0 em 2021 foi de aproximadamente 116 bilhões de dólares, contra 101 bilhões de 2020. A expectativa é que esses investimentos cheguem a 337 bilhões de dólares em 2028 (FBI, 2021).

A Indústria 4.0 apresenta, como objetivo estratégico, melhorar a cadeia de valor em todas as fases do ciclo de vida do produto, controlando e organizando os processos e redes que geram valor, criando um novo modelo de negócio e adaptando as empresas aos novos formatos de competitividade, por meio da implementação de tecnologias, consideradas base, como os Sistemas Físico-cibernético (*Cyber-Physical Systems – CPS*), Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*), Objetos Inteligentes (*Smart Objects*), Big Data, entre outras (ANDERL, 2015; LASI *et al.*, 2014). A utilização dessas tecnologias, de forma integrada, estabelece a base para a formação das fábricas inteligentes, produtos

inteligentes, processos inteligentes e serviços inteligentes (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2015).

O conceito Indústria 4.0 subdivide as integrações entre fábricas, componentes, processos e tecnologias em três níveis: 1. integração vertical: integra diferentes sistemas da tecnologia da informação, em diferentes níveis hierárquicos de um sistema de produção; 2. integração horizontal: integra vários sistemas de TI para o suporte e/ou execução de diferentes processos, tanto dentro como além dos limites de uma empresa; 3. integração de ponta a ponta (*end-to-end*) do ciclo de vida do produto: corresponde a uma digitalização e cruzamento inteligentes, ao longo de todas as fases do ciclo de vida do produto, desde a aquisição da matéria-prima, até o fim da vida do produto (BITKOM *et al.*, 2015; VDI/VDE-GMA, 2015).

Com o avanço nas pesquisas sobre o conceito, observa-se que, além das tecnologias base e integrações, existem também os princípios de concepção e outras tecnologias consideradas como suporte (ou tendências tecnológicas) para a implementação da Indústria 4.0, conforme apresentado na Figura 2 (GHOBAKHLOO, 2018).

Devido ao tema ainda estar em constante desenvolvimento, os princípios de concepção da Indústria 4.0 abordam explicitamente a questão da indefinição do conceito, fornecendo uma sistematização do conhecimento e descrevendo seus constituintes. Esses princípios de concepção permitem que as empresas prevejam o progresso da sua adaptação para alcançar o conceito Indústria 4.0, concedendo a elas o conhecimento sobre "como fazer", em relação ao desenvolvimento de soluções e procedimentos adequados e necessários para a transição do formato corrente em direção à Indústria 4.0 (HERMANN *et al.*, 2016; GHOBAKHLOO, 2018).

Já as tecnologias de suporte, ou tendências tecnológicas, são as inovações digitais avançadas que, coletivamente, permitem o surgimento da nova tecnologia industrial digital, conhecida como Indústria 4.0 (GILCHRIST, 2016; LIAO *et al.*, 2017; GHOBAKHLOO, 2018).



Figura 2 – Princípios de Concepção e Tendências Tecnológicas da I4.0

(traduzido de Ghobakhloo, 2018)

Além da Alemanha, onde o termo Indústria 4.0 foi utilizado pela primeira vez, a disseminação do conceito vem avançando globalmente, mesmo com terminologias diferentes. Na China, por exemplo, a terminologia utilizada é “Fabricado na China 2025” (*Made in China 2025*) e visa modernizar totalmente a indústria manufatureira do país. No Japão é utilizado o termo “Iniciativa da Cadeia de Valor Industrial” (*Industrial Value Chain Initiative*) e para o país esse novo modelo de indústria representa tanto uma oportunidade quanto um desafio, em relação ao gerenciamento da digitalização das indústrias. A Coreia do Sul, por sua vez, utiliza o termo “Inovação da Manufatura 3.0” (*Manufacturing Innovation 3.0*) e os benefícios da Indústria 4.0, para o país, são amplamente reconhecidos, tanto que o governo sul-coreano lançou um projeto nacional voltado, principalmente, para ajudar as pequenas e médias empresas a

aumentar sua capacidade de produção, por meio do uso de tecnologias avançadas, com o objetivo de transformar essas empresas em fábricas inteligentes. Já nos Estados Unidos, observa-se a utilização de vários termos, que englobam o conceito Indústria 4.0, como “Internet das Coisas” (*Internet of Things - IoT*), “Internet Industrial” (*Industrial Internet*), “Produção Inteligente” (*Smart Production*) e “Manufatura Avançada” (*Advanced Manufacturing*) e o país tem como objetivo trazer a inovação digital para o mundo físico, incentivando as empresas de todos os portes a se envolverem mais e se beneficiarem das tecnologias pertencentes ao conceito (KAGERMANN *et al.*, 2016; SIAU e ZOU, 2019).

Com o avanço desses países no desenvolvimento tecnológico, estima-se que a Indústria 4.0 alcançará resultados financeiros e operacionais expressivos, ao redor de todo o mundo, melhorando, por exemplo, tanto a governança quanto a capacidade de análise dos dados das empresas em, aproximadamente, 41% e trazendo reduções de custos operacionais de 31% (GATES *et al.*, 2018). Com a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, espera-se que as empresas alcancem reduções de custos de, aproximadamente, 3,6% ao ano, que se converteriam em termos globais em, aproximadamente, 421 bilhões de dólares, além de um aumento anual de receita de 2,9%, o que equivale a 493 bilhões de dólares, ao redor do mundo (GEISSBAUER *et al.*, 2016). Além desses dados, calcula-se que as empresas terão um aumento de eficiência de, aproximadamente, 19% em relação ao desenvolvimento de novos produtos, uma redução de 17% no tempo de sua introdução no mercado e, conseqüentemente, uma redução de 13% em seus custos operacionais. Adicionalmente, as empresas que vêm alcançando um alto nível de digitalização, podem gerar mais de 30% de suas receitas com produtos e serviços totalmente digitais (GEISSBAUER *et al.*, 2019).

Devido a esses resultados, muitas estratégias vêm sendo desenvolvidas para auxiliar na implementação do conceito Indústria 4.0. Em 2015, a PWC desenvolveu uma ferramenta de avaliação do preparo das empresas para a implementação da Indústria 4.0, com o objetivo de fornecer uma compreensão

da sua posição em relação ao conceito, medindo e classificando seus níveis de maturidade real em relação aos seus objetivos de maturidade, ao longo de seis dimensões, identificando, assim, as necessidades de ação (PWC, 2016). No mesmo ano, a Impuls também desenvolveu um método para a avaliação do preparo das empresas em relação à implementação da Indústria 4.0, com o objetivo de apoiá-las nesse processo (LICHTBLAU, 2015). Já em 2020, a Acatech desenvolveu um índice de maturidade, com o objetivo de fornecer um meio para estabelecer o estágio de maturidade atual da Indústria 4.0, nas empresas, e de identificar medidas concretas para ajudá-las a atingir um estágio de maturidade superior, a fim de maximizar os benefícios econômicos da Indústria 4.0 (SCHUH *et al.*, 2020).

Assim, a avaliação dos processos atuais e a consequente identificação das áreas de atuação, fornecem às empresas orientações específicas e práticas para modelar a sua transformação digital. Autores como Schumacher *et al.* (2016), Leyh *et al.* (2016) e Gökalp *et al.* (2017) também desenvolveram seus modelos de preparo ou maturidade, com o objetivo de auxiliar as empresas na avaliação do seu estado atual e quais lacunas ainda existem para a implementação da Indústria 4.0, como, por exemplo, os desafios referentes à implementação dos princípios de concepção e das suas principais tecnologias.

2.1.1. TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0

Um dos passos fundamentais para a introdução da Indústria 4.0 é a seleção e implementação das tecnologias de informação e comunicação (*Information and Communication Technologies – ICT*) (ANDERL, 2015). Conforme o conhecimento sobre o tema avança, surgem mais abordagens de quais tecnologias são importantes, ou base, para a implementação do conceito. Para a Acatech (2020), Indústria 4.0 é composta por elementos tecnológicos que auxiliam as empresas em sua implementação. O relatório cita como elementos: Capacidade de Verificações e Análises em Tempo Real, Integração de Sistemas, Big Data, Aprendizagem de Máquina, Inteligência Artificial, Sistema de Apoio a Tomada de Decisão, Integrações Verticais e Horizontais dos Sistema e Processo

e Sistemas Físico-Cibernéticos. De acordo com o relatório, esses elementos contam ainda com o apoio de determinadas tecnologias, como IoT, Realidades Aumenta e Virtual, Manufatura Aditiva e Computação em Nuvem, para a implementação do conceito de forma integral.

Geissbauer *et al.* (2016) apresentam onze tecnologias consideradas base para a implementação da Indústria 4.0: Dispositivos Móveis, IoT, Detectores de Localização, Interfaces Avançadas de Homem-Máquina, Autenticação e Detecção de Fraudes, Manufatura Aditiva, Sensores Inteligentes, Big Data e Algoritmos Avançados, Interações Multiníveis com Clientes, Realidade Aumentada e Computação em Nuvem (Figura 3). Segundo os autores, a implementação dessas tecnologias permite a digitalização e integração de cadeias de valor verticais e horizontais, a digitalização de ofertas de produtos e serviços e o desenvolvimento de modelos de negócios digitais e de acesso ao cliente.

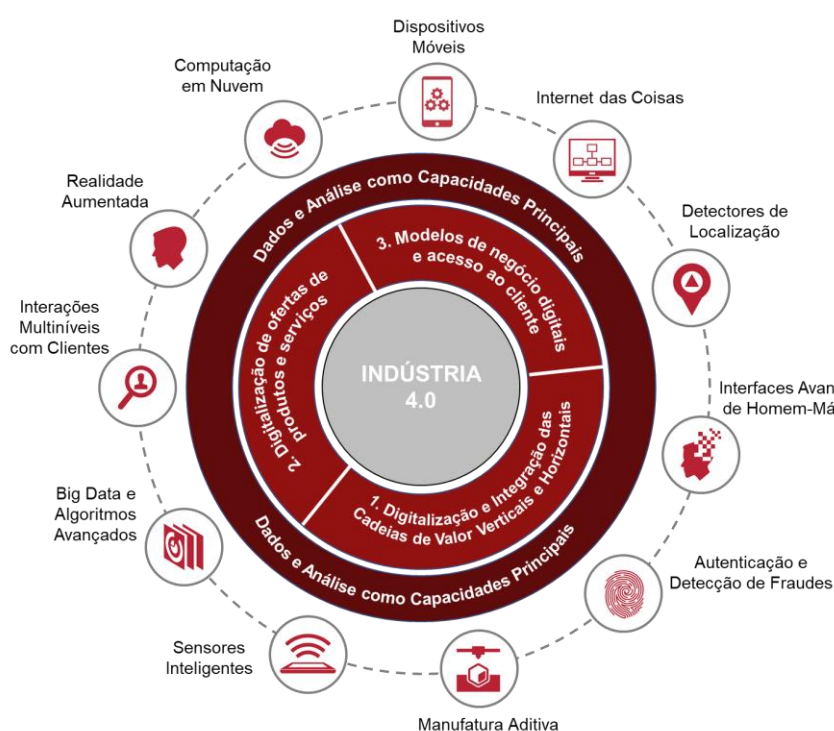


Figura 3 – Tecnologias da Indústria 4.0, segundo Geissbauer *et al.*, 2016

Ghobakhloo (2018) afirma que a Indústria 4.0 é composta por quatorze tecnologias de suporte, consideradas tendências tecnológicas, como a Internet

das Coisas (IoT), Internet de Serviços (IoS), Internet das Pessoas (IoP), Internet dos Dados (IoD), Computação em Nuvem, Big Data, *Blockchain*, Segurança Cibernética, Realidade Aumentada, Automação e Robôs Industriais, Manufatura Aditiva, Modelagem e Simulação, Sistemas Físico-Cibernéticos (CPS) e Tecnologias Semânticas. Para o autor, essas tecnologias representam as inovações tecnológicas digitais avançadas, que, coletivamente, possibilitam o surgimento da Indústria 4.0.

Bibliardi *et al.* (2020) comentam que a manufatura inteligente (*smart manufacturing*) é a coleção de tecnologias de ponta que apoiam a tomada de decisão eficaz e precisa, em tempo real, por meio da utilização de várias tecnologias da informação e comunicação (ICT), como os CPS, a IoT, a Computação em Nuvem, a Big Data, a Aprendizagem de Máquina (*Machine Learning*), as tecnologias avançadas de manufatura, como sensores, controles descentralizados, robótica avançada, realidade aumentada, tecnologias avançadas de rastreamento e manufatura aditiva. Para os autores, a implementação do conceito torna-se completa, quando essas tecnologias convergem com as tecnologias já existentes no sistema de produção.

Para Schuh *et al.* (2020), os elementos tecnológicos que compõem a Indústria 4.0 são as Integrações de Sistemas, Capacidades Tecnológicas em Tempo Real, Big Data, Aprendizagem de Máquina, Inteligência Artificial, Sistemas de Suporte a Decisão, Tomada de Decisão Automatizada, Processo Vertical e Horizontal e os CPS. Para eles, o objetivo da implementação desses elementos é desenvolver características na empresa, como a capacidade de aprendizagem, agilidade, capacidade de se adaptar continuamente às novas condições e de tomar decisões mais rápidas, por meio da alta qualidade de dados disponíveis.

Na análise de Küpper (2019), a Indústria 4.0 conta com nove tecnologias que formam a base para a transformação industrial. Para o autor, os Robôs Autônomos, a Simulação, a Integração do Sistema Vertical e Horizontal, a IoT, a Segurança Cibernética, a Computação em Nuvem, a Manufatura Aditiva, a Realidade Aumentada e a Big Data compõem a nova tecnologia digital industrial, com o objetivo de reunir e analisar dados entre máquinas, permitindo processos

mais rápidos, flexíveis e mais eficientes, produzindo produtos de alta qualidade, a custos reduzidos (Figura 4). Ainda segundo o autor, essa revolução da manufatura aumentará a produtividade, mudará a economia, promoverá o crescimento industrial e modificará o perfil da força de trabalho, em última análise, mudando a competitividade das empresas e regiões.

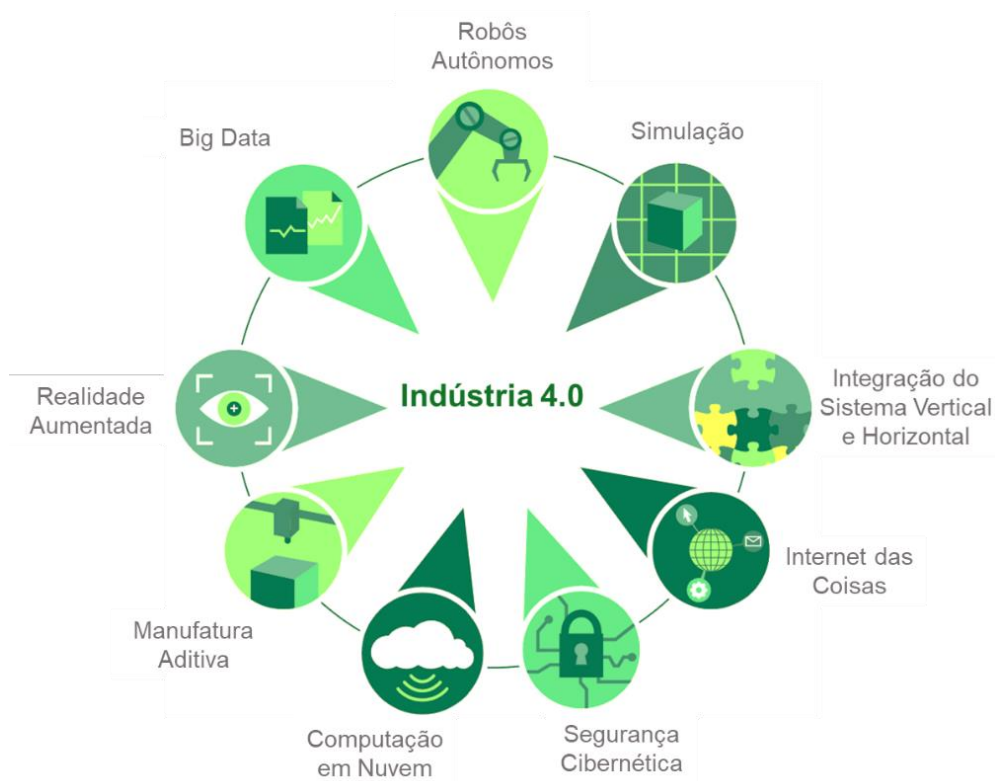


Figura 4 – Tecnologias da Indústria 4.0, segundo Küpper, 2019

Na observação de Frank *et al.* (2019), as tecnologias da indústria 4.0 podem ser divididas em, pelo menos, duas camadas diferentes, de acordo com seu objetivo principal, conforme proposto na Figura 5. No centro da figura, os autores apresentam o que chamam de “Tecnologias de Ponta” (*Front-End Technologies*), compostas pela Cadeia de Suprimentos Inteligente (*Smart Supply Chain*), Trabalho Inteligente (*Smart Working*), Manufatura Inteligente (*Smart Manufacturing*) e Produto Inteligente (*Smart Product*). Para os autores, essas tecnologias são consideradas de ponta, pois as quatro dimensões "inteligentes" estão relacionadas às necessidades operacionais e de mercado. A segunda camada, representada na parte inferior da figura, é composta por tecnologias chamadas de base, que compreendem tecnologias que fornecem

conectividade e inteligência para tecnologias de ponta. Essa camada é a que viabiliza a Indústria 4.0, diferenciando-a das etapas industriais anteriores. Isso ocorre porque as tecnologias de base permitem que as tecnologias de ponta sejam conectadas em um sistema de manufatura integrado completo.

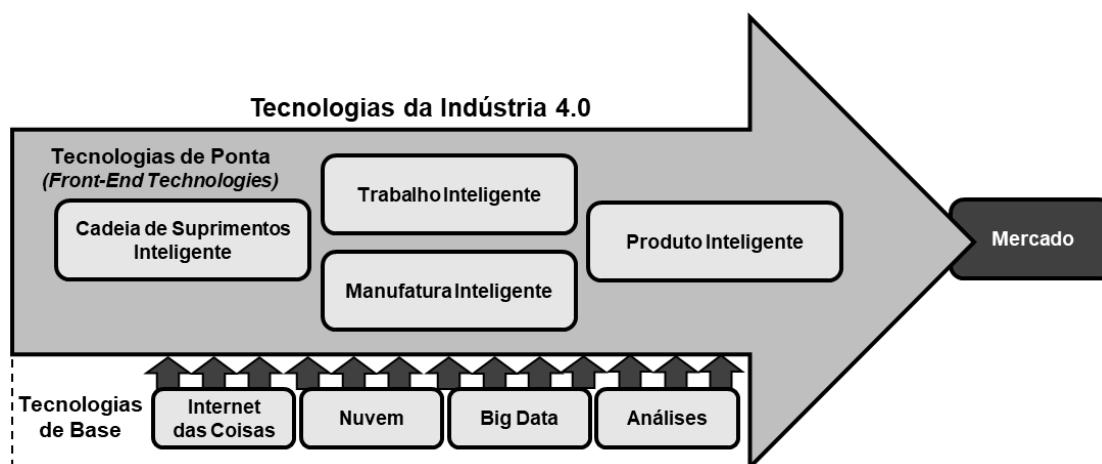


Figura 5 – Tecnologias da Indústria 4.0, segundo Frank *et al.*, 2019

Assim, com a implementação das tecnologias do conceito Indústria 4.0, são esperados benefícios tanto operacionais (entre 10% e 25% no ganho de produtividade), quanto financeiros (até 3.7 trilhões de dólares até 2025), em toda a cadeia (RÜBMANN *et al.*, 2015; SCHMITZ *et al.*, 2019).

Com base nas revisões abordadas nesta seção, o Quadro 1 apresenta um resumo das definições dos elementos tecnológicos ou tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

Quadro 1 – Definições das tecnologias da Indústria 4.0

Tecnologias da Indústria 4.0	Definições	Autores
Verificações e Análises em Tempo Real	São sistemas da informação e dispositivos que aceleram os processos de coleta e análise e rápida de dados e a recuperação de informações, possibilitando a otimização do processo de tomada de decisão, apoiando o monitoramento da planta.	ACATECH. "Indústria 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies, Acatech, 2020.
Big Data	São sistemas da informação que apresentam com objetivo em primeiro momento, coletar, armazenar, processar e revisar uma grande quantidade de dados, de modo a identificar quais dados realmente são relevantes, tornando-os disponíveis e visíveis aos tomadores de decisão. Além disso, a Big Data objetiva, ainda, realizar uma análise mais profunda dos dados e obter informações com potencial de impacto de nível estratégico para a empresa, pois essas análises podem levar à procura de ideias novas e criativas, e não para uma simples troca de informações, identificando padrões comportamentais, que eventualmente permitam prever o comportamento futuro até certo ponto.	ACATECH – Industry 4.0 maturity index: managing the digital transformation of companies, Acatech Study, 2017. ACATECH. "Indústria 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies, Acatech, 2020.
Aprendizagem de Máquina	O aprendizado de máquina (ou Machine Learning), é uma aplicação da inteligência artificial que fornece ao computador a capacidade de aprender e melhorar automaticamente com a experiência, sem ser explicitamente programado. O aprendizado de máquina se concentra no desenvolvimento de 'softwares' que podem acessar dados e usá-los para aprender com eles. O processo de aprendizagem começa com observações de dados de modo a procurar padrões e tomar boas decisões com base nos exemplos fornecidos. Desta forma, o objetivo principal é permitir que os computadores aprendam automaticamente sem intervenção humana.	MAYR, A.; WEIGELT, M.; KÜHL, A.; GRIMM, S.; ERLI, A.; POTZEL, M.; FRANK, J. "Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0". Procedia CIRP 72, pp. 622-628, 2018.
Inteligência Artificial	A inteligência artificial é uma tecnologia que provê análises sistemáticas de causa-efeito de diversas possibilidades de soluções, priorizando-as para alcançar melhores resultados. Ela é entendida como um esforço para se fazer computadores pensarem, no sentido completo e literal da semântica "máquinas com mentes", para que executem funções onde se requer inteligência quando realizadas por humanos. Adicionalmente, a inteligência artificial estuda os computadores para fazer com que possam perceber, raciocinar e agir.	Matara.GM Indústria 4.0: Proposta De Um Método De Avaliação Do Grau De Aderência De Equipamentos De Logística Interna Ao Conceito De Sistemas Físico-Cibernéticos. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da UNIMP, 2019.
CPS	Os sistemas físico-cibernéticos são definidos como o trabalho em conjunto de computadores e sistemas físicos, de forma que computadores embarcados controlem os processos físicos, necessariamente com um processo de retorno de respostas (feedback) entre ambos, onde os processos físicos afetam os computacionais e vice-versa.	LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A cyber physical systems architecture for industry 4.0 – based manufacturing systems. Manufacturing Letters 3, p.18-23, 2015.
IoT	Apresenta como definição a interação e interconectividade de objetos, por meio de redes sem fio ou a cabo, mediante ao auxílio de sensores onipresentes, com o objetivo da troca mútua de dados, possibilitando que tecnologias existentes e emergentes se comuniquem entre si e com os seres humanos de forma inteligente e autônoma.	ACATECH – Industry 4.0 maturity index: managing the digital transformation of companies, Acatech Study, 2017. ACATECH. "Indústria 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies, Acatech, 2020.
Manufatura Aditiva	A definição de manufatura aditiva é relatada como tecnologia que permite imprimir objetos compondo camadas de plástico ou metal, evitando o desperdício de material em processos como corte. Usada inicialmente para produzir protótipos ou pequenas séries de peças complexas, vem sendo utilizada para produção em larga escala.	LAUREUS, R.E.; ROCA, J.B.; NARRA, S.P.; MONTGOMERY, C.; BEUTH, J.L.; FUCHS, E.R.H. "Metal additive manufacturing: Cost competitive beyond low volumes". Journal of Manufacturing Science and Engineering, 139 (8), Article 081010, 2017. OETTMEIER, K.; HOFMANN, E. "Additive manufacturing technology adoption: An empirical analysis of general and supply chain-related determinants". Journal of Business Economics, 87 (1), pp. 97-124, 2017.
Automated Guided Vehicles (AGV)	Os veículos guiados automaticamente (ou AGVs) são equipamentos ou sistemas de manuseio de materiais, como carrinhos, paletes, bandejas ou empilhadeiras, equipados com sensores e atuados programados para o transporte de mercadorias, a fim de apoiar atividades intra-logísticas com pouca ou nenhuma interação humana. Os AGVs podem também contar com os CPS para atuar de forma ainda mais automática ou autônoma.	ROMERO, D.; GWARDIELLI, P.; POWELL, D.; WUEST, T.; THÜRER, M. Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: The Emergence of Digital Lean Manufacturing and The Meaning of Digital Waste. Conference: APMS - Production Management for Data-Driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing At: Seoul, Korea; Volume: 1. Moon et al. (Eds.), IFP, AICT 535, Part I. Springer, pp. 11-20, 2018.
Autoidentificação (RFID)	A Autoidentificação é uma tecnologia destinada a complementar ou substituir a tecnologia tradicional de código de barras para identificar, monitorar e rastrear itens automaticamente. O objetivo dessa tecnologia é adicionar inteligência e minimizar a intervenção humana no processo de identificação de itens usando etiquetas eletrônicas. Os componentes básicos do sistema são: 1- Transponders (Tags) que permitem a identificação dos itens. 2- Antenas e Leitores/gravadores que permitem interrogar e responder tags. 3- Software que controla os equipamentos e gerencia os dados e interfaces com aplicativos corporativos. Observe que a configuração exata de uma implantação específica depende do fornecedor, do integrador de sistemas e do aplicativo.	RAMDAN, M.; WANG, Z.; NOCHIE, B. RFID-Enabled Dynamic Value Stream Mapping. Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, 2012.
Computação em Nuvem	A Computação em Nuvem é um serviço que fornece acesso a máquinas, sistemas, software e ferramentas, por meio de redes como a Internet. Essa tecnologia aborda o uso de recursos virtuais em vez de físicos e oferece às empresas uma capacidade aumentada de extrair, armazenar e processar informações, adicionando uma acessibilidade otimizada aos dados, sistemas e equipamentos conectados à Internet.	DALMARCO, G.; RAMALHO, F. R.; BARROS, A. C.; & SOARES, A. L. "Providing industry 4.0 technologies: The case of a production technology cluster". The Journal of High Tech. Management Research, 30 (2), p. 100355, 2019.
Digital Twin	A Digital Twin (ou gêmeo digital), chamado também por "sombra digital", é uma parte essencial de como a Indústria 4.0 pode oferecer os benefícios que promete e é essencialmente uma réplica digital da peça, processo, linha de produção ou qualquer outra entidade física, que é então vinculada ao objeto real para criar um sistema físico cibernético.	ACATECH – Industry 4.0 maturity index: managing the digital transformation of companies, Acatech Study, 2017.
Dispositivos Móveis/Eletrônicos	São tecnologias que possibilitam a gestão da informação e execução de atividades por meio de dispositivos inteligentes como smartphones, tablets, smartwatches e smart glasses.	MAYR, A.; WEIGELT, M.; KÜHL, A.; GRIMM, S.; ERLI, A.; POTZEL, M.; FRANK, J. "Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0". Procedia CIRP 72, pp. 622-628, 2018.

Quadro 1 – Definições das tecnologias da Indústria 4.0 (cont.)

Tecnologias da Indústria 4.0	Definições	Autores
e-Learning	A plataforma de e-learning oferece um ambiente digital (ou seja, um laboratório virtual) para o treinamento dos operadores, combinado com um laboratório físico para acelerar a qualificação e requalificação dos operadores. O principal objetivo da plataforma de e-learning é garantir que todos os operadores sejam treinados em procedimentos de segurança, de instalação/configuração da máquina, de manutenção da máquina e de montagem/instruções de trabalho em laboratórios virtuais, antes da execução dessas atividades no mundo físico, permitindo que testem seus conhecimentos em cada rodada de treinamento.	POWELL, D.; ROMERO, D.; GAIRDELLI, P.; CIMINI, C.; CAVALIERI, S. "Towards Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: Industry 4.0 Technologies as Enablers of Leaner Production". Conference: APMS - Production Management for Data-driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing At: Seoul, Korea Volume I. Moon et al. (Eds.), IFIP, AICT 536, Part II, Springer, pp. 353-362, 2018.
Embalagens Inteligentes	É uma tecnologia que integra embalagens de peças com sensores inteligentes, auxiliando nos processos de gerenciamento de peças/inventários. Por exemplo, com o sistema de embalagens inteligentes, é possível controlar a taxa de ocupação dessas embalagens e rastreá-las ao longo do processo de fabricação em tempo real.	PEKARCCKOVA, M.; TREBUNA, P.; KLIMENT, M.; ROSOCHA, L. Material flow optimization through e-kanban system simulation. International Journal of Simulation Modelling 19(2):243-254, June 2020.
Interação Homem-Computador	Concentra-se no uso de tecnologias computacionais (como softwares e hardwares), para auxiliar na execução de tarefas das pessoas. Alguns exemplos dessas tecnologias são: Aplicativos utilizados em dispositivos móveis; websites interativos aplicados em computadores de mesa ou móveis.	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, pp. 622-628, 2018.
Interação Homem-Máquina	Refere-se à comunicação e interação entre um humano e uma máquina, por meio de uma interface de usuário. As Interações Homem-Máquina são realizadas com o apoio de sistemas/tecnologias computacionais que fazem a interpretação de dados/informações de diversos canais de comunicação (com os sensores). Dessa forma, os operadores podem receber e controlar e informações de um (sub)sistema de automação e esse (sub)sistema de automação recebe e processa as entradas dos operadores.	ROMERO, D.; GAIRDELLI, P.; POWELL, D.; WUEST, T.; THÜRER, M. Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: The Emergence of Digital Lean Manufacturing and The Meaning of Digital Waste. Conference: APMS - Production Management for Data-Driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing At: Seoul, Korea Volume I. Moon et al. (Eds.), IFIP, AICT 535, Part I, Springer, pp. 11-20, 2018.
Memória Digital de Objetos	É um espaço de armazenamento digital destinado a manter permanentemente todas as informações relacionadas a uma instância de objeto físico concreto que é coletada durante a vida útil desse objeto e, portanto, forma um bloco de construção básico para a Internet das Coisas (IoT) conectando informações digitais a objetos físicos. Essas memórias exigem que cada instância de objeto seja identificada de forma exclusiva e que esse ID seja anexado ao objeto físico.	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, pp. 622-628, 2018.
Plug & Play	Essa tecnologia oferece a capacidade de instalar ou adicionar um novo componente (e fazê-lo funcionar) em um sistema produtivo, sem a necessidade de realizar algum procedimento de instalação complexo ou análise técnica. Alguns exemplos de aplicação dessa tecnologia: o desenvolvimento de módulos de máquina intercambiáveis flexíveis, de diferentes fabricantes; integração autônoma de um sistema técnico baseado em um design modular e uma arquitetura orientada a serviços.	SANDERS, A.; SUBRAMANIAN, K.R.K.; REDLICH, T.; WULFSBERG, J.P. "Industry 4.0 and Lean Management – Synergy or Contradiction? A Systematic Interaction Approach to Determine the Compatibility of Industry 4.0 and Lean Management in Manufacturing Environment". IFIP International Federation for Information Processing, pp. 341-349, 2017.
Plug & Produce	Na manufatura, essa tecnologia é definida como a capacidade de um sistema de produção em identificar automaticamente um componente novo ou modificado e integrá-lo corretamente ao processo de produção em execução, sem esforços manuais e alterações no projeto ou no sistema de produção.	KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. "Towards a Lean Automation Interface for Workstations." International Journal of Production Research, Forthcoming 55: 2845-2856, 2016.
Realidade Aumentada	Realidade aumentada é a integração de informações virtuais ao mundo real por meio da combinação de elementos 3D com o contexto espacial da fábrica. Permite interatividade e processamento em tempo real da projeção de imagens, sendo usado tanto para melhorar o processo de fabricação quanto para testar novos produtos.	POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; OYARZUN, D.; STRICKER, D.; DE AMICIS, R.; VALLARINO, I. "Visual computing as a key enabling Technology for Industrie 4.0 and industrial internet". IEEE Computer Graphics and Applications, 35 (2), pp. 26-40, 2015.
Realidade Virtual	Realidade Virtual é o uso de tecnologia computacional para criar um ambiente simulado. A aplicação da realidade virtual na Indústria 4.0 tem uma orientação diferenciada devido ao nível de imersão que proporciona ao usuário. Por meio da realidade virtual, simulações exatas de produtos, processos ou plantas de produção podem ser construídas para ver seu funcionamento em primeira pessoa e de forma imersiva. Portanto, a realidade virtual é utilizada, por exemplo, para a fase de projeto de produtos ou processos e validação de protótipos, pois os engenheiros podem verificar o andamento realizado de forma mais visual e interativa por meio de uma simulação virtual. Desta forma, os erros nesta fase podem ser reduzidos e a produtividade aumentada.	CIANO, M.P.; DALLASEGA, P.; ORZES, G.; ROSSI, T. "One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study". International Journal of Production Research, 2021.
Robotização	A robotização é composta por robôs autônomos são robôs (móveis e/ ou fixos) que operam em processos físicos automatizados e interagem com operadores humanos ou com outros robôs em um comportamento intuitivo de autoaprendizagem. Os robôs eventualmente interagem entre si e trabalham com segurança lado a lado com os humanos e aprendem com eles. Esses robôs custam menos e têm uma gama maior de recursos dos que os usados comumente na fabricação.	AWAIS, M.; HENRICH, D. "Human-robot interaction in an unknown human intention scenario". 11th international conference on frontiers of information technology, pp. 89-94, 2013. BONKENBURT, T. "Robotics in Logistics. A DP DHL perspective on implications and use cases for the logistics industry". DHL Trend Research, 2016
Sensorização	A sensorização é definida como a utilização de dois ou mais sensores para a combinação das informações desses sensores, com o intuito de obter uma propriedade particular do ambiente mensurado. A sensorização integra dados de sensores, ou derivado desses, sendo que a informação resultante é a mais adequada, que se os sensores fossem usados individualmente.	Matana G.M. Indústria 4.0: Proposta De Um Método De Avaliação Do Grau De Aderência De Equipamentos De Logística Interna Ao Conceito De Sistemas Físico-Cibernéticos. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da UNIMEP, 2019.
Simulação	A simulação permite a virtualização do design do produto, processos e layout da fábrica. As ferramentas de simulação permitem testar modelos virtuais de produtos ou processos antes de aplicá-los em soluções reais, otimizando o desenvolvimento de novas tecnologias	POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; OYARZUN, D.; STRICKER, D.; DE AMICIS, R.; VALLARINO, I. "Visual computing as a key enabling Technology for Industrie 4.0 and industrial internet". IEEE Computer Graphics and Applications, 35 (2), pp. 26-40, 2015. SHELLSHEAR, E.; BERLIN, R.; CARLSON, J.S. (2015). "Maximizing smart factory systems by incrementally updating point clouds". IEEE Computer Graphics and Applications, 35 (2), pp. 62-69, 2015.

2.1.2. BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0

Com a implementação da Indústria 4.0, muitas empresas visam alcançar benefícios importantes para o aumento da vantagem competitiva de seus negócios. Para Geissbauer *et al.* (2016), a implementação do conceito trará um aumento de 20% na receita das empresas, reduções anuais dos custos operacionais de 3,6% e, conseqüentemente, um aumento na eficiência de 4,1%, anualmente.

De acordo com a Boston Consulting Group (2022) a expectativa de benefícios relativos à aumentos de produtividade, por setor da indústria, gerados pela implementação das tecnologias da Indústria 4.0 é: 1. Setor Automotivo: aumento de 6% a 9%; Setor de Componentes: aumento de 4% a 7%; Setor de Alimentos e Bebidas: 5% a 10%; Setor de Maquinário: 10% a 15%; Outros Setores: 4% a 7%. Caylar *et al.* (2016) citam que a implementação da Indústria 4.0 pode resultar em oito principais benefícios, ou impulsionadores de valor (*Value Drivers*) para as empresas (Figura 6).

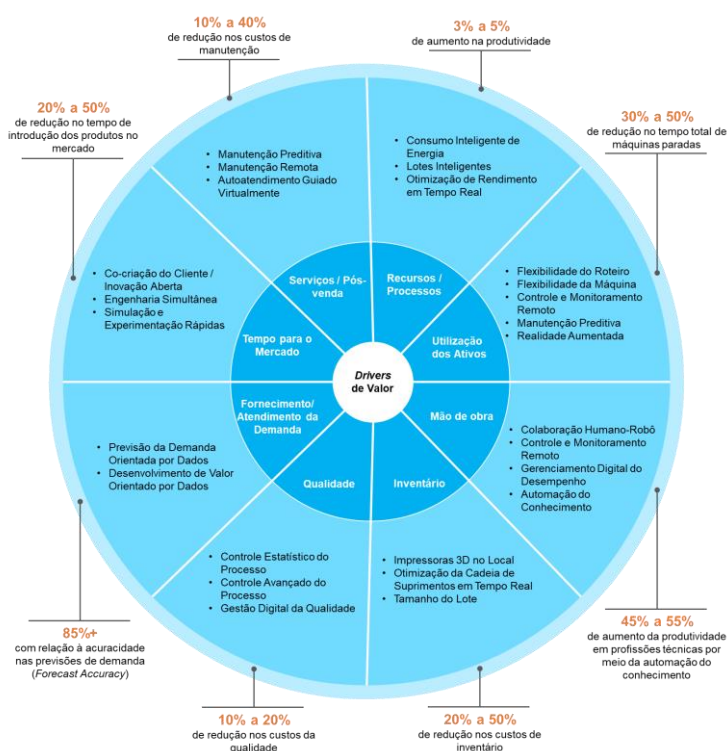


Figura 6 – *Drivers* de Valor da Indústria 4.0
(traduzido de Caylar *et al.*, 2016)

Esses *drivers* de valor são compostos por:

- Recursos/Processos: Melhoria de um processo em relação ao consumo de material, aumento de velocidade, ou melhoria no rendimento, visando reduções de custo, geração de valor e, conseqüentemente, aumento da receita.
- Utilização dos Ativos: Melhoria na utilização dos ativos para geração de valor, mediante um melhor uso do parque de máquinas de uma empresa. Isso aplica-se especialmente a indústrias de ativos pesados, com máquinas caras, em que cada minuto que uma máquina não produz, pode causar uma perda, em termos de despesas de capital e diminuição da receita.
- Mão de Obra: Visto que a mão de obra é um fator importante, referente à análise de custos, na maioria das indústrias, melhorar a produtividade do trabalho pode gerar um valor significativo. Esse valor pode ser capturado por meio de ações que reduzem o tempo de espera, ou aumentam a velocidade das operações dos trabalhadores, reduzindo o esforço ou a complexidade de suas tarefas.
- Inventários: Estoque em excesso provoca a retenção de capital, levando a altos custos para a gestão desse capital. A Indústria 4.0 tem como alvo reduzir o excesso de estoque, eliminando problemas, como os números imprecisos de estoque e o planejamento de demanda não confiável, fatores que exigem um estoque de segurança ou superprodução;
- Qualidade: Melhorar a qualidade é um impulsionador de valor, pois a sucata e produtos que exigem retrabalho geram custos extras. Essas ineficiências na qualidade são causadas por processos instáveis de fabricação, embalagem deficiente na cadeia de suprimentos, ou distribuição e instalação não especializadas. A eliminação de problemas, durante o processo de criação de valor, utilizando impulsionadores da Indústria 4.0, como o controle avançado do processo e o gerenciamento digital de desempenho, pode gerar valores significativos para as empresas.

- **Fornecimento/Atendimento da Demanda:** Somente um entendimento perfeito da demanda do cliente, em relação à quantidade e às características do produto que os clientes estão dispostos a pagar, maximiza o valor capturado do mercado. Portanto, otimizar o fornecimento (ou a oferta) com a demanda real, pode gerar ganhos expressivos para as empresas. A previsão da demanda, com base em análises avançadas, por exemplo, pode aumentar a precisão dessa previsão para mais de 85%, em uma base semanal.
- **Tempo para o Mercado:** Chegar com um novo produto mais cedo ao mercado cria valor adicional para as empresas, mediante maiores receitas e vantagens potenciais para os pioneiros. Portanto, cada impulsionador da Indústria 4.0 que acelera o processo de desenvolvimento, como engenharia simultânea ou experimentação/prototipagem rápida (por exemplo, com a utilização de impressão 3D) ajudará a gerar valor para a empresa.
- **Serviços/Pós-venda:** Uma vez que os custos de operação são impulsionados pelos custos de serviços (por exemplo, manutenção e reparo) e tempos de inatividade da máquina (por exemplo, devido a incidentes inesperados), observa-se que oferecer soluções para diminuí-los pode gerar maior valor para as empresas. A manutenção remota é um dos impulsionadores da Indústria 4.0, referentes a serviços.

Para os autores, esses oito *Drivers* de Valor têm impacto significativo no desempenho das empresas, pois, para cada um deles, existem impulsionadores da Indústria 4.0 que normalmente levam a melhorias.

Além dessas expectativas de benefícios que a Indústria 4.0 pode trazer, muitas empresas já começaram a relatar, na prática, ganhos importantes em seus negócios, por meio da implementação dos princípios de concepção e das tecnologias do conceito. Kohli (2017), por exemplo, comenta que uma rede de hospitais nos Estados Unidos, alcançou uma redução de 23% no seu inventário,

por meio da digitalização da cadeia de suprimentos, resultando em um benefício financeiro, estimado, de 68 milhões de dólares, ao longo de 10 anos.

Já Leurent e Boer (2019) citam vários exemplos de benefícios que as empresas estão alcançando com a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como a Bosch que utilizou ferramentas de tomada de decisão, com base nas tecnologias da Big Data, para aumentar sua produção em até 10%, em situações de alta demanda. A Microsoft, por sua vez, para garantir a competitividade de seus produtos e serviços ao cliente, transformou seu processo de fabricação, adotando a digitalização e a conexão em rede dos equipamentos, utilizando ferramentas de previsão da Big Data e aplicando a aprendizagem de máquina (*machine learning*) para criar linhas de manufatura cognitivas. Com isso, a empresa alcançou um aumento no rendimento de suas operações de, aproximadamente, 30%, o que resultou em um benefício financeiro de 5 milhões de dólares, somente com a redução de refugo e quase 200 milhões de dólares referentes à redução de inventário.

Outro exemplo apresentado pelos autores é o da Procter & Gamble (P&G) que, por meio da implementação do conceito estratégico da Indústria 4.0, e, conseqüentemente, das suas tecnologias, pôde alcançar em três anos, resultados expressivos em suas operações, como um aumento de produtividade de, aproximadamente, 160%, aumento de 116% na satisfação dos clientes, redução de reclamações e problemas de campo de 63%, redução total de custos de suas operações de 20%, redução de inventário de 43%, redução de não conformidades de 42% e redução do tempo de preparo das máquinas (*set-up time*) de 36%. Por fim, os autores relatam o caso da Hewlett Packard que, mediante a utilização das tecnologias da Indústria 4.0 como IoT e Big Data, pôde reduzir em 50% seus custos com manutenções de equipamentos.

Outros autores que citam os benefícios atuais das tecnologias da Indústria 4.0 são Dekhne *et al.* (2019). O exemplo utilizado por eles é o da DHL que, por meio da utilização de tecnologias como IoT, Big Data e AGVs (*Automated Guided Vehicles*), nas operações de coleta e entrega de materiais, em que os AGVs movem-se, de forma autônoma pela instalação, ao lado dos trabalhadores,

aprendendo e compartilhando automaticamente as rotas de viagem mais eficientes, proporcionaram uma redução no tempo de ciclo do pedido em até 50% e alcançaram um ganho de produtividade (em até duas vezes) na coleta e entrega de materiais.

2.2. PRINCÍPIOS E PRÁTICAS DA FILOSOFIA *LEAN*

Originado do Sistema Toyota de Produção, o *Lean* consiste em um conjunto de princípios e práticas que atuam no contexto industrial, para alcançar a melhoria contínua, por meio da eliminação de desperdícios. A filosofia *Lean* está inserida nas organizações, com o objetivo de proporcionar-lhes vantagem competitiva, por meio de gestão multidisciplinar das equipes de trabalho e das redes de clientes e fornecedores (KOLBERG e ZÜHLKE, 2015; VALAMEDE e AKKARI, 2020).

Verifica-se que desde a sua introdução, as opiniões, interpretações, características e aplicações do *Lean* são diversas (HOSS e CATEN, 2013; RUFFA, 2008). Nessa direção, Bhasin e Burcher (2006) se referem ao *Lean* como uma “Filosofia”, facilitada ou aplicada, por meio da utilização de práticas que abordam aspectos sociais, culturais, ferramentas ou processos, aplicados diretamente nas operações. Em um contexto similar, Shah e Ward (2003), comentam que o *Lean* é uma abordagem multidimensional que engloba uma ampla variedade de práticas em um sistema integrado. Para os autores, as práticas do *Lean* são seus principais impulsionadores, pois podem funcionar sinergicamente para criar um sistema simplificado e de alta qualidade, que produza produtos acabados, de acordo com a demanda do cliente, com pouco ou nenhum desperdício.

Com relação ao desperdício, Ohno (1988) define como todas as atividades de um processo de manufatura que não apresentam um valor agregado. Ohno (1988) e Womack e Jones (1996) identificaram e relataram sete tipos desperdícios, no contexto da manufatura:

- Superprodução (excesso de produção) - ocorre quando as operações continuam depois que deveriam ter cessado. Isso resulta em um excesso de produtos em processo, finalizados e um aumento do estoque.
- Espera - ocorre quando há períodos de inatividade em um processo posterior devido a uma atividade do processo anterior não foi entregue no prazo.
- Transporte - Movimento desnecessário de materiais ou de trabalho em processo (*Work-In-Process* - *WIP*). Em geral, o transporte deve ser minimizado, pois aumenta o tempo do processo, durante o qual nenhum valor é adicionado e com o risco de danos no manuseio.
- Processamento extra - Operações extras como retrabalho, reprocessamento, manuseio ou armazenamento que ocorrem devido a defeitos, superprodução ou excesso de estoque.
- Estoque - Todo o estoque que não é diretamente necessário para atender aos pedidos atuais do cliente. O inventário inclui materiais para a produção, produtos em processamento e produtos acabados. Todo o estoque requer manuseio e espaço adicionais. Sua presença também pode aumentar significativamente o processamento extra.
- Movimento - Refere-se às etapas extras executadas por funcionários e equipamentos para acomodar um *layout* ineficiente, defeitos, reprocessamento, superprodução ou excesso de estoque. O movimento leva tempo e não agrega valor ao produto ou serviço.
- Defeitos - Bens acabados ou serviços que não estão em conformidade com a especificação ou expectativa do cliente, causando assim a sua insatisfação.

Liker e Morgan (2006), citam que a filosofia *Lean* vem evoluindo há décadas, tornando-se um modelo competitivo de manufatura, em todo o mundo. Os autores abordam ainda o modelo da Toyota, representado por uma casa (Figura 7), que contempla os principais princípios e práticas do *Lean*, que sustentam essa filosofia, conforme descrições a seguir:

- *Just-in-Time (JIT)*: Tem como objetivo permitir que o material flua pelos processos de forma muito rápida, levando a peça certa, ao lugar certo, na hora certa. Por meio do JIT, pode-se criar uma célula de manufatura em que a matéria-prima (uma peça por vez) se mova de uma operação para outra, sem interrupção. Em alguns casos, é necessário interromper o fluxo para conectar processos separados, então, cria-se um conceito chamado de supermercado, em que as solicitações dos clientes acionam o reabastecimento, por meio do *kanban*.
- *Jidoka*: Representa uma máquina com inteligência humana. A inteligência consiste em realizar uma tarefa simples, como detectar um desvio e parar a operação enquanto se espera pela tomada de decisão. Esse conceito foi estendido para processos manuais, nos quais os operadores param a produção quando há algum problema. Quando uma máquina ou pessoa para a atividade devido a problemas, eles também precisam solicitar apoio. Assim, um *Andon* é utilizado nessa solicitação de apoio, como um sistema composto por luzes e sons. Dessa forma, ao parar a operação no momento da identificação do problema, ele é contido na área em que foi identificado, prevenindo que chegue a outros processos ou ao cliente.
- *Heijunka* e Processos Padronizados e Estáveis: Apresenta como objetivo a criação de um fluxo nivelado de pedidos e da carga de trabalho. Assim, quando a carga de trabalho é nivelada, existem oportunidades para padronizar e estabilizar processos. Além disso, para que o nivelamento da carga funcione, é preciso fazer o nivelamento do inventário, pois, caso contrário, o sistema não será capaz de acompanhar. Dessa forma, são necessários processos estáveis e padronizados, para que se alcance uma produção *just-in-time*.
- Pessoas engajadas no *Kaizen*: Se tornou praticamente uma palavra universal, mas raramente é praticado na maioria das organizações, como uma verdadeira melhoria contínua que se espalha pelas operações. *Kaizen* não é opcional em um sistema enxuto, de forma que reduzir o estoque significa que os problemas realmente param a operação,

privando os processos subsequentes de peças. O *Jidoka* significa máquinas e pessoas desligando o sistema quando há um problema. Isso expõe os problemas e é fundamental que as pessoas sejam qualificadas e motivadas o suficiente para resolvê-los muito rapidamente, pois, caso contrário, o resultado é simplesmente uma erosão da eficiência da produção e da competitividade.

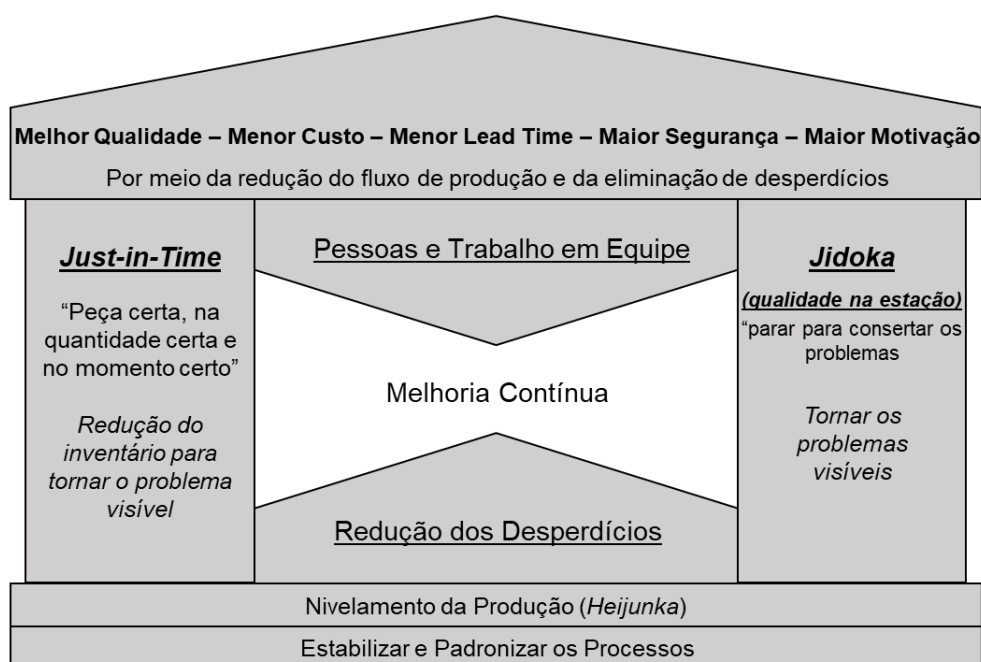


Figura 7 – A casa do sistema de produção Toyota

(traduzido de Liker e Morgan, 2006)

Os autores relatam ainda que esse modelo é representado no formato de uma casa, pois todos os pilares devem ser implementados de forma plena, para que a filosofia alcance os melhores resultados.

Na pesquisa de Womack e Jones (1997), os autores propuseram a transformação das empresas de produção em massa, em organizações *Lean*. Com o objetivo de ampliar o escopo da filosofia, os autores introduziram alguns elementos para um desenvolvimento amplo do *Lean* nas empresas. Por meio da combinação das ferramentas, métodos e estruturas de processos e do alinhamento com a gestão e liderança organizacional, os autores conceberam cinco princípios do *Lean* (Quadro 2), que devem ser implementados, de forma

cíclica, para obter benefícios, atualizando-os conforme as informações dos clientes.

Quadro 2 – Princípios do *Lean*

Princípios do <i>Lean</i>	Definições
Definir Valor	Definição de valor na perspectiva do cliente, expresso em um produto ou serviço que satisfaça as necessidades do comprador a um preço e prazo específicos.
Mapear o Fluxo de Valor	Mapeamento de todas as atividades vinculadas ao processo de manufatura. Com o mapeamento do fluxo de valor, as empresas devem enxergar as operações que agregam e não agregam valor, eliminando aquelas que geram perdas/deperdícios.
Criar Fluxo	Introdução de atividades que agregam valor ao fluxo contínuo, para evitar estoques intermediários, falhas nos prazos de entrega ou retrabalho não planejado.
Estabelecer o <i>Pull</i>	Com base no princípio <i>Just-in-time</i> , é necessário produzir apenas o necessário e na data certa. Os pedidos dos clientes lideram o processo de fabricação.
Busca pela Perfeição	A busca pela melhoria é feita de forma a abranger toda a organização, incentivada em todos os seus níveis operacionais. Isso faz com que a cadeia de valor flua mais rápido.

(traduzido de Womack e Jones, 1997)

Com relação a esses cinco princípios, Womack e Jones (1997), citam:

- Definição de valor se refere a todas as características ou funções de um produto ou serviço que atendam às necessidades do cliente, pelas quais ele esteja disposto a pagar.
- Fluxo de valor são as diferentes sequências de atividades necessárias para projetar, produzir e entregar um produto ou serviço ao cliente, incluindo processamento de informações e fornecimento de matéria-prima. Atividades que não agregam valor ao cliente são consideradas desperdícios, os quais são classificados em dois tipos: os que não são necessários e devem ser eliminados e os que, no entanto, são necessários. Um exemplo de desperdício necessário é o controle de qualidade: o cliente não paga pelo controle de qualidade, mas deseja um produto confiável e, portanto, o controle (ou garantia de qualidade) é necessário.
- A criação de fluxo garante que a produção seja realizada sem problemas, sem interrupção ou espera; elimina todas as perdas desnecessárias; e as perdas necessárias podem ser reduzidas.

- Estabelecer o *Pull* significa configurar um sistema de produção, em que cada etapa de produção é realizada a pedido da etapa seguinte, a partir do cliente. Isso torna possível limitar os estoques de trabalho em andamento, tanto quanto possível.
- Busca pela perfeição apresenta a melhoria contínua como o princípio fundamental no pensamento *Lean*, de modo que ele deve fazer parte da cultura da organização.

Na visão de Shah e Ward (2003), a filosofia *Lean* realiza uma abordagem multidimensional, que abrange uma ampla variedade de práticas de gerenciamento, incluindo *just-in-time*, sistemas de qualidade, equipes de trabalho, manufatura celular, gerenciamento de fornecedores etc. Na pesquisa realizada pelos autores, foram identificadas 21 práticas *Lean*, conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Práticas Lean

Práticas Lean	
1 Remoção de gargalos	12 Estratégias de planejamento e programação
2 Manufatura celular	13 Manutenção preventiva
3 Benchmarking competitivo	14 Medições de capacidade do processo
4 Programas de melhoria contínua	15 Sistema Pull / Kanban
5 Força de trabalho multifuncional	16 Programas de gestão de qualidade
6 Reduções do tempo de ciclo	17 Técnicas de mudança rápida (set-up time reduction)
7 Produção focada na demanda do cliente	18 Reengenharia do processo de produção
8 Just-In-Time / Fluxo contínuo	19 Programas de melhoria de segurança
9 Reduções de Inventário	20 Equipes de trabalho autogerenciáveis
10 Otimização de manutenção	21 Gestão de qualidade Total
11 Novos equipamentos / tecnologias de processo	

(adaptado de Shah e Ward, 2003)

Para os autores, os principais impulsionadores do *Lean* são essas práticas, pois elas podem funcionar sinergicamente para criar um sistema simplificado de alta qualidade, que produza produtos acabados, no ritmo da demanda do cliente e com pouco ou nenhum desperdício.

Já Bortolotti *et al.* (2015), afirmam que o *Lean* é interpretado como um sistema gerencial que integra práticas específicas para reduzir a variabilidade de processos internos e externos, buscando a eliminação das principais fontes de

problemas de produção. Os autores apresentam ainda as principais práticas *Lean*, utilizadas na implementação da filosofia, conforme Quadro 4.

Quadro 4 – Práticas Lean

Práticas Lean			
1	Redução do tempo de preparo	7	Treinamento dos colaboradores
2	Just-in-time	8	Envolvimento da liderança na qualidade
3	Fluxo Contínuo	9	Parceria com fornecedores
4	Controle Estatístico do Processo	10	Envolvimento dos clientes
5	Manutenção autônoma	11	Melhoria Contínua
6	Solução de Problemas		

(adaptado de Bortolotti *et al.*, 2015)

Observa-se que, no trabalho desenvolvido por Baskaran e Lakshmanan (2019), os autores citam que a melhoria no desempenho das indústrias depende da seleção de princípios e práticas *Lean* adequados (ou essenciais) e a não utilização deles pode ocasionar em um alto nível de desperdício de recursos, aumento de custos e utilização de tempo precioso da gestão, por parte das empresas. Os autores citam que os líderes devem selecionar de forma correta as práticas ou princípios essenciais do *Lean* para que as organizações alcancem um alto desempenho. Dessa forma, na pesquisa desenvolvida por eles, as 25 práticas ou princípios essenciais do *Lean* são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Princípios e Práticas Lean

Princípios e Práticas Lean			
1	Manufatura Celular	10	Liderança
2	5S	11	TPM
3	Gestão Visual	12	Manutenção Autônoma
4	Células de Trabalho	13	Poka-Yoke
5	Organização do Layout	14	SMED
6	Kaizen	15	Confiabilidade na Manutenção
7	Equipe multifuncional	16	Nivelamento
8	Segurança e Ergonomia	17	Jidoka
9	Respeito pelas Pessoas		
18		18	Operação Padronizada
19		19	Seis Sigma/Gestão da Qualidade
20		20	Balaceamento da Linha (Heijunka)
21		21	Just-in-Time
22		22	Integração dos Fornecedores e clientes
23		23	One Piece Flow
24		24	Supermercado
25		25	Estoque de Segurança

(adaptado de Baskaran e Lakshmanan, 2019)

Segundo eles, essas práticas ou princípios são fundamentais para a implementação da filosofia *Lean* de forma completa.

Dentre essas práticas ou princípios, observa-se, por exemplo, a Gestão Visual como uma prática utilizada para tornar as ações de trabalho visíveis, a fim de melhorar o fluxo da operação (BEYNON-DAVIES e LEDERMAN, 2017). Ela apresenta como objetivo deixar os processos de produção compreensíveis para os trabalhadores de chão de fábrica e gerentes, de modo que visualizem claramente todas as etapas do trabalho em execução, de uma maneira responsiva e consistente. Os exemplos incluem fluxogramas, folhas de verificação e controle, sinalizações visuais e sonoras. Essas ferramentas visuais enfocam o trabalhador, individualmente, em sua estação de trabalho, e auxilia, por exemplo, na redução de problemas relacionados à qualidade (JACA *et al.* 2014).

Outra prática que se pode destacar é a Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance* – TPM), que apresenta como objetivo contribuir para a otimização das atividades de manutenção produtiva, preventiva e corretiva, a fim de atingir o nível máximo de eficiência e lucro dos equipamentos de produção. Para tanto, a TPM conta com ferramentas como eficácia geral do equipamento (*Overall Equipment Effectiveness* - OEE), SMED (*Single Minute Exchange of Die*), 5S, manutenção autônoma, técnicas da qualidade na manutenção, controle inicial da produção e um ambiente de segurança e higiene (BRAH e CHONG, 2004; BELEKOUKIAS *et al.*, 2014).

Nota-se também a *Poka-Yoke* como uma prática importante na filosofia *Lean*, pois é considerada um mecanismo de detecção de erros e defeitos, que inspeciona 100% das peças, e atua de forma independente da atenção do operador (SHINGO, 1988; SAURIN *et al.*, 2012). Grout (2007), comenta que a *Poka-Yoke* se concentra no uso de processos ou recursos de projeto, com o objetivo de prevenir erros ou o impacto negativo desses erros. Middleton (2001) cita que a *Poka-Yoke* é uma prática sistemática, focada na erradicação de erros, por meio da eliminação da causa raiz. E Plonka (1997), considera que a *Poka-Yoke* é um mecanismo utilizado para detectar, eliminar e corrigir erros em sua origem, antes que eles cheguem ao cliente.

O SMED é outra prática do *Lean*, considerada importante na operação das empresas, pois auxilia na redução dos tempos de preparo (*set-up time*) das máquinas e equipamentos. A ferramenta se baseia em uma melhor organização das atividades de troca e regulação das peças da máquina e do molde. Além disso, modificações físicas da máquina e do molde devem ser feitas para reduzir o tempo de instalação (CHIARINI, 2014). Shingo (1985), comenta que o SMED é composto por três etapas principais: 1. Classificando os preparos (ou *set-ups*) entre internos e externos; 2. Convertendo o preparo interno em preparo externo; 3. Simplificando todos os aspectos do preparo da operação. Para o autor, essas três etapas são essenciais para a redução do tempo total de preparo.

Já a prática Gemba-walk (ou caminhada na operação) defende a visão em que, para entender completamente um problema, é necessário visitar o local de trabalho real e observar o impacto do que está acontecendo, analisando o que influencia os fluxos de trabalho e de valor. Junto as caminhadas ao gemba, recomenda-se que a equipe utilize técnicas de questionamento, como a 5W2H (por que, o quê, onde, quando, quem, como, quantos/quanto). A técnica de questionamento facilita o exame crítico em que cada atividade é submetida, a partir de uma série sistemática e progressiva de perguntas utilizadas para identificar as fontes de desperdícios, facilitando as ações de melhoria (TYAGI *et al.*, 2015; SETH *et al.*, 2017).

A gestão de pessoas é mais uma prática que apoia a implementação da filosofia *Lean*, pois, de acordo com Forrester (1995) os processos *Lean* devem ser orientados por pessoas, porque apenas os colaboradores estão em melhor posição para identificar formas de melhorar os processos de produção. Segundo o autor, para que as empresas alcancem um alto desempenho dos colaboradores, a filosofia *Lean* deve abranger também uma estratégia sobre a gestão de pessoas, incluindo educação, treinamento e práticas de remuneração. Beltran-Martin *et al.* (2008), argumentam que a remuneração relacionada ao desempenho, que também pode incluir recompensas não monetárias, ajuda a impulsionar os colaboradores a contribuírem para a produtividade da organização. As necessidades de educação e treinamento devem se concentrar

no desenvolvimento de habilidades técnicas e sociais, com ênfase, sempre que possível, em equipes autogerenciadas como forma de capacitar os funcionários a trabalharem independentemente, para o benefício da organização e desenvolverem suas capacidades de resolução de problemas e tomada de decisão.

Outra prática ou princípio que apoia a implementação do *Lean* é a integração da organização com seus fornecedores (cadeia de suprimentos), por meio da utilização de sistemas e aplicativos de TI, considerando que essa ação envolve o compartilhamento de informações para alcançar a sincronização de decisões e colabora contratualmente com fornecedores selecionados, para compartilhamento de riscos (SO e SUN, 2010). O compartilhamento eficaz de informações nas cadeias de fornecimento tem um efeito significativo na prática da gestão da cadeia de suprimentos, possibilitando outras práticas *Lean* como, por exemplo, a fabricação "*just-in-time* (JIT)", a qual requer a implementação de sistemas puxados (*pull systems*) e gerenciamento de suprimentos com base no compartilhamento de informações, formando a base da gestão da cadeia de suprimentos. (SERVE *et al.*, 2002; ZHOU e BENTON, 2007).

Já a prática de integração entre as organizações e seus clientes está diretamente ligada aos princípios "definição de valor" e "estabelecer o *pull*" (WOMACK e JONES, 1997). O cliente faz parte da integração, com relação à criação de valor do fornecedor e com o sistema *pull*, pois toda a transação implica em informação e coordenação sobre o projeto de produto específico do cliente. A integração do cliente é uma forma de criação de valor industrial, em que os clientes participam em atividades e processos antes vistos como domínio das empresas. O resultado é um sistema de coprodução, ou seja, uma interação e adaptação empresa-cliente para obtenção de benefícios mútuos (PILLER e MÖSLEIN, 2002; BETHA, 2007). Tsigkas e Freund (2008), relatam ainda que as organizações *Lean* que atuam em um formato adaptativo e evolutivo, devem ser capazes de aprender continuamente dentro e fora da organização, mediante a interação direta com seus clientes, integrando o cliente ou usuário ao ciclo de criação de valor e expandindo esse conhecimento na cadeia de suprimentos.

Assim, pode-se observar a disseminação desses princípios e práticas *Lean*, a partir de uma pesquisa realizada pela consultoria Staufen AG (2016). Nessa pesquisa, foram entrevistados mais de 1500 executivos na Alemanha, Áustria e Suíça, e pôde-se identificar que 90% das empresas entrevistadas consideram que a aplicação da filosofia *Lean* tem um papel fundamental na melhoria da produtividade e do tempo de entrega dos produtos. Além disso, os respondentes afirmaram que essa filosofia aumenta a competitividade, melhora os resultados financeiros, atua de forma positiva na liderança das empresas, aumentando a satisfação dos clientes.

2.3. INTERAÇÕES ENTRE O *LEAN* E AS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

Mesmo com os benefícios que as tecnologias da Indústria 4.0 podem proporcionar (e já vêm proporcionando para as empresas), nota-se que ainda existem muitas incertezas sobre a implementação dessas tecnologias, principalmente quando se analisa o investimento necessário e o tempo para que se alcancem esses benefícios. Também existem muitas dúvidas sobre os riscos, desafios e oportunidades inerentes à implementação dessas tecnologias (RÜTTIMAN e STÖCKLI 2016).

Um dos riscos, desafios ou oportunidades que vem sendo abordado pela academia, consultorias e indústrias é a implementação da Indústria 4.0 sem considerar filosofias já fundamentadas, como é o caso do *Lean* (MAYR *et al.* 2018).

Já em 2006, Ward e Zhou (2006) identificaram que as ferramentas do *Lean* são responsáveis pela medição do impacto da integração das tecnologias da Informação nos resultados das empresas (como, por exemplo, na redução do *lead time*). Para os autores, os resultados positivos que as empresas alcançam, por meio dos investimentos em tecnologias da informação, estão diretamente relacionados com a prévia implementação das ferramentas do *Lean*, pois essas ferramentas possibilitam o potencial da integração das tecnologias da informação, tanto dentro da empresa, quanto entre as empresas.

Para Prinz *et al.* (2018), os passos para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 podem alcançar o sucesso, se os processos, bem como a organização da produção, já foram otimizados, no sentido de uma gestão *Lean* e, se o conceito geral do *Lean* já tenha sido estabelecido, não apenas organizacionalmente, mas, acima de tudo, culturalmente. Para os autores, um processo organizado, com base em dados registrados e analisados de forma inteligente, não será eficiente, se o próprio processo não estiver organizado, por meio do gerenciamento *Lean*. Com base nessas informações, os autores desenvolveram um quadro em que os desafios dos sistemas de produção podem ser endereçados mediante o uso dos métodos *Lean* e/ou com a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 (Quadro 6).

Quadro 6 – Desafios dos processos produtivos que podem ser resolvidos pelo *Lean* e/ou Indústria 4.0

Desafios nos Processos Produtivos	Possível solução em relação aos métodos de gerenciamento <i>Lean</i>	Possível Solução em relação às tecnologias da Indústria 4.0
Superprodução	Pull	CPS
Falta de Padronização	5S	-
Controle de Produção Centralizado	Pull	CPS
Fluxo de Material	Pull	CPS / Produto Inteligente
Processos Extensos / Complexos	<i>Kanban</i> / Gestão à Vista / <i>Gemba</i>	CPS / <i>Kanban</i> Digital / Gestão à Vista em Tempo Real
Erros de Processo	<i>Poka-Yoke</i>	Sistemas de Assistência / Realidade Aumentada
Produtos Defeituosos	<i>Jidoka</i>	-
Demanda volátil do cliente	<i>Heijunka</i>	CPS
Falha na Máquina	-	Sistemas de Assistência / Realidade Aumentada
Ausência do Operador	-	Sistemas de Assistência
Falha do Operador	-	Sistemas de assistência / Realidade Aumentada
Cadeia de suprimentos volátil	-	CPS
Planejamento de Cenários	-	Simulação / Realidade Virtual
Consistência dos Dados	-	Plataformas de Comunicação Aberta (OPC) / Digitalização
Rastreabilidade dos Produtos	-	CPS / <i>QR-Codes</i> / <i>Near Field Communication</i> (NFC)
Coleta de Dados	-	<i>Big Data</i> / Aquisição de Dados da Produção (BDE) / Aquisição de Dados da Máquina (MDE)

(traduzido de Prinz *et al.*, 2018)

Em um estudo realizado por Haartman *et al.* (2020), em 548 empresas europeias de manufatura, observou-se que a filosofia *Lean* é considerada habilitadora para a implementação dos princípios de concepção e das tecnologias da Indústria 4.0. Os autores observam, por exemplo, que o *Lean* pode apresentar uma capacidade de absorção, fazendo com que as empresas adquiram, assimilem,

transformem e explorem o conhecimento externo. Essa capacidade é fundamentada em investimentos anteriores, nas áreas do conhecimento, ou tecnologia, e consiste basicamente em ativos de conhecimento e mecanismos de integração. De acordo com os autores, o *Lean* oferece muitos mecanismos de integração, usados na aquisição e transformação de novos conhecimentos, como, por exemplo, o mapeamento do fluxo de valor e o tempo reservado para criatividade e inovação. Também oferece mecanismos de dispersão do conhecimento pela organização, como o trabalho em equipe e a segmentação do chão de fábrica. Uma exploração eficiente do conhecimento é de fato o objetivo de muitas práticas *Lean*, como as instruções de trabalho padronizadas e a integração de tarefas. Dessa forma, é razoável supor que os princípios e práticas *Lean* proporcionem a capacidade de absorção também com as novas tecnologias digitais relacionadas com a produção. Os autores observam ainda algumas explicações empíricas, para a forte ligação entre *Lean* e digitalização:

- O primeiro tema é baseado no conceito em que o *Lean* direciona para processos mais padronizados e transparentes, permitindo a sua combinação com a tecnologia digital. Os sistemas digitais tendem a ser muito sequenciais, bem como específicos do produto e do *hardware*, enquanto o *Lean* visa reduzir a complexidade. Portanto, é concebível que as empresas que trabalham com o *Lean* simplifiquem seus processos, a ponto de se tornar mais fácil selecionar e implementar tecnologias digitais, escolhendo e projetando sistemas digitais mais enxutos.
- O segundo tema envolve a digitalização, sendo usada como um método para controlar o *Pull*. Isso implica que a produção seria primeiramente organizada, de acordo com os princípios do *Pull* e, em seguida, as tecnologias digitais seriam trazidas para auxiliar no arranjo. Observa-se que, enquanto a melhoria contínua é utilizada para aperfeiçoar um processo, as simulações podem alcançar, mais rapidamente, os mesmos benefícios. Assim, as empresas que aspiram à melhoria contínua podem ter maior probabilidade de ver os benefícios associados aos métodos de simulação. Dessa forma, as simulações podem ser usadas para avaliar

os benefícios associados às técnicas *Lean*. As empresas com experiência na implementação dessas técnicas podem estar mais propensas a apreciar os benefícios de tais simulações.

- Como terceiro tema, observa-se que os sistemas de gestão de ideias apoiam a melhoria contínua, mas que os fatores relacionados à gestão de recursos humanos também são necessários. Como o Gerenciamento de Recursos Humanos é uma parte essencial do *Lean*, sugere-se que as empresas *Lean* estão em uma melhor posição para implementar sistemas de gerenciamento de ideias, o que, por sua vez, pode tornar a empresa ainda mais *Lean*.
- O quarto e último tema refere-se às fortes ligações entre o *Lean* e a digitalização, dependendo das características das tecnologias digitais. As fábricas digitais, por exemplo, oferecem tecnologias mais avançadas e gráficas, que auxiliam na análise das variações do processo, o que é fundamental para tornar os processos de produção ainda mais enxutos. Dessa forma, os déficits referentes à integração do *Lean* podem ser resolvidos por meio das tecnologias digitais. Isso implica que as tecnologias digitais podem muito bem aumentar a eficácia das iniciativas *Lean*. Portanto, as empresas que implementarem mais técnicas *Lean* poderão se beneficiar mais com a digitalização e, sendo assim, estarão mais inclinadas a investir em tais tecnologias.

Com base nessa análise, Haartman *et al.* (2020) definem que os princípios e práticas do *Lean*, como Orientação para o Fluxo (*Flow Orientation*), Organização do Trabalho (*Work Organization*) e Gestão dos Recursos Humanos (*Human Resources Management*) exercem influência habilitadora para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como os sistemas digitais para troca autônoma de informações, na cadeia de suprimentos, realidade virtual e/ou simulação, na reconfiguração da produção, realidade virtual e/ou simulação no desenvolvimento de produto, sistemas autônomos para gestão do ciclo de vida do produto e sistemas de armazenamento e gestão de ideias (*Big Data*).

Anosike *et al.* (2021), comentam que a implementação de tecnologias de autoidentificação, em setores em que o *Lean* está implementado, pode proporcionar melhorias significativas de desempenho em produtividade, capacidade de resposta e tomada de decisão que são potencialmente alcançáveis ao aprimorar métodos e ferramentas do *Lean*, com os recursos de coleta de dados e informações em tempo real.

Tortorella *et al.* (2019) citam que a pura adoção das tecnologias da Indústria 4.0, sem que se considere o *Lean*, pode não resultar nos benefícios esperados, pois os princípios do *Lean* são fundamentais nessa adoção, uma vez que eles auxiliam no desenvolvimento de hábitos e mentalidades (*mindset*) organizacionais que favorecem as melhorias sistêmicas de processos. Os autores citam ainda que as mudanças organizacionais sociotécnicas, proporcionadas pelo *Lean*, reforçam práticas e comportamentos que, quando combinados adequadamente com os avanços tecnológicos da Indústria 4.0, permitem às empresas competir com sucesso, sob o cenário paradoxal, em que as aplicações de alta tecnologia e simplicidade humana existem simultaneamente. Com isso, os autores avaliam que os princípios do *Lean*, como *Pull*, Fluxo (*Flow*), e baixo tempo de preparo (*low set-up time*), impactam de forma positiva na implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como a automação digital, sensores, sistemas de execução da manufatura, modelos virtuais, IoT, manufatura aditiva, computação em nuvem, simulação e a *Big Data*.

Já para Jarrahi *et al.* (2019), as práticas *Lean* são consideradas base para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, em fundamentalmente, quatro temas:

- Padronização e orientação dos processos: A padronização de processos e a ausência de desperdícios auxiliam as empresas no enfrentamento do aumento da complexidade associada ao enorme fluxo de informações, trazido pelas novas tecnologias da Indústria 4.0. Além disso, essa padronização pode facilitar a integração de recursos físicos e digitais (CPS) na produção, evitando a “digitalização de desperdícios”.

- **Orientação para parcerias:** O verdadeiro desafio da digitalização está na capacidade de trocar informações, em toda a cadeia de valor da empresa, pensando na fábrica como parte de uma rede maior, na qual diferentes organizações colaboram, compartilham dados e informações (*Big Data* e *IoT*). Esse conceito é geralmente inaceitável para muitas empresas, pois as tradicionais tendem a evitar o compartilhamento de informações com outras partes. Porém, as organizações com o *Lean* implementado são mais abertas para compartilhar informações e conhecimento, de modo que a coordenação estratégica com seus parceiros é reconhecida como um pré-requisito para a integração de processos. Por exemplo, a propensão de ouvir seus clientes e integrar os processos *upstream* e *downstream* da cadeia de abastecimento, por meio do VSM, facilita na identificação das ações mais eficazes para garantir um fluxo constante e sustentado de informações. Além disso, o gerenciamento das atividades diárias, de acordo com uma lógica padronizada que vem do uso de ferramentas, como o PDCA, torna a introdução e o compartilhamento de padrões de gerenciamento de informações e dados mais fácil, conforme os requisitos para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0.
- **Melhoria contínua, atitudes multifuncionais, orientação de aprendizagem mútua, envolvimento dos funcionários e versatilidade de habilidades:** Uma das questões mais discutidas para a transição do estado atual da empresa para a Indústria 4.0 está relacionada à falta de habilidades e competências tecnológicas, o que torna necessária a realocação de recursos, em todos os níveis da organização. Porém, as empresas que possuem as práticas *Lean*, tendem a superar esses desafios, por meio da melhoria contínua e aprimoramento diário da organização. Além disso, a orientação para o trabalho em equipe, que leva pessoas de diferentes funções, culturas e idades a colaborar facilmente entre si, possibilita a superação do obstáculo relacionado à orientação para aprendizagem mútua, pois o aprendizado tecnológico pode ser difundido mediante o apoio entre os funcionários. Nota-se também que, os altos níveis de versatilidade das habilidades, alcançados por organizações *Lean* que

trabalham frequentemente com a gestão da mudança como um fator essencial para mover os indivíduos para o estado futuro esperado, reduzem a preocupação com o possível desemprego, trazido pela introdução das tecnologias da Indústria 4.0.

- Orientação para o planejamento de longo prazo e comunicação funcional: A introdução eficaz da Indústria 4.0 depende também da capacidade de gerenciamento do plano de introdução (de médio e longo prazo) e, conseqüentemente, de comunicá-lo, de maneira adequada, a fim de evitar estresse desnecessário na organização. Essa prática *Lean* pode ser uma facilitadora da Indústria 4.0, pois pode auxiliar na priorização para implementação das tecnologias e na comunicação efetiva da função de cada tecnologia.

Com relação ao estudo desenvolvido por Sanders *et al.* (2017), nota-se que determinadas ferramentas do *Lean* podem ser consideradas base para a implementação da Indústria 4.0. Os autores aplicaram uma matriz de interdependência, com o objetivo de analisar a relação entre as ferramentas do *Lean* e os princípios de concepção da Indústria 4.0. Por meio dessa matriz, observou-se que a padronização exerce uma ação habilitadora importante nos princípios de concepção conhecidos, como modularidade e interoperabilidade da Indústria 4.0, do mesmo modo que o VSM e o SMED exercem ações habilitadoras na descentralização. Na análise dos autores, o estudo demonstrou a importância de se remover a maioria dos desperdícios das operações, antes da implementação das tecnologias da Indústria 4.0. A padronização também demonstrou-se igualmente importante para alcançar a modularidade e interoperabilidade, pois todos os dispositivos dos CPS, em uma fábrica inteligente, devem ter um protocolo padrão para comunicação. Além disso, para habilitar o princípio *Plug & Play* na troca flexível de módulos de máquina, diferentes fabricantes do módulo devem adotar padrões de integração. Já na virtualização é importante manter padrões de dados consistentes para posterior processamento. Da mesma forma, o SMED (*Single Minute Exchange of Die*) auxilia a meta da Indústria 4.0 de tamanhos de lote reduzidos para atingir um

tamanho de lote unitário, reduzindo o tempo de configuração. Os dados de fluxo de valor são alimentados na nuvem (*cloud computing*) e as máquinas os acessam continuamente por meio da IoT. O estado atual do fluxo de valor é monitorado e se houver alguma discrepância, ele reage de forma independente para resolver o problema sem controle central (sistemas autônomos).

Marinelli *et al.* (2021), apresentaram, como resultado de uma pesquisa realizada com 200 profissionais de diferentes empresas de manufatura, que a implementação prévia de determinadas práticas *Lean* pode auxiliar na implementação e utilização de determinadas tecnologias da Indústria 4.0. Para os autores, a utilização de dados em tempo real pode facilitar o fluxo contínuo e os CPS podem trabalhar com algoritmos preditivos na programação ótima de tarefas de manutenção, no contexto da TPM. Além disso, a troca de dados entre o chão de fábrica e outros departamentos, habilitada pela IoT, pode auxiliar na melhoria contínua e tomada de decisões. Já a Big Data, pode apoiar o empoderamento da força de trabalho para os objetivos de melhoria contínua e o aprimoramento dos procedimentos do VSM. Por fim, o uso de elementos robóticos pode facilitar os colaboradores na execução de tarefas padronizadas.

Na visão de Erro-Garcés (2019), os métodos apresentados pela filosofia *Lean* podem ser usados como base estratégica para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, pois esses métodos realizam mudanças culturais nas empresas, alterando as formas como os trabalhos são realizados e essas ferramentas de mudança podem auxiliar no desenvolvimento da Indústria 4.0. Além disso, o *Lean* pode trazer melhorias de eficiência e de qualidade na produção, reduzindo custos, em particular no consumo de energia e eliminação dos desperdícios, tornando-se um habilitador para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. A autora comenta, ainda, sobre a necessidade de preparo da mão de obra, e da organização como um todo, incluindo a alta liderança, para a comunicação, aceitação e correta utilização das tecnologias da Indústria 4.0, o que também pode ser desenvolvido por ferramentas do *Lean*.

Em uma análise realizada por Dombrowski *et al.* (2017), em que 260 empresas alemãs foram pesquisadas quanto à aplicação das tecnologias da Indústria 4.0,

identificou-se que os oito princípios do *Lean* (padronização, zero defeitos, gestão à vista, melhoria contínua, orientação de funcionários e gestão por objetivos, fluxo contínuo, sistema *pull* e prevenção/eliminação de desperdício) devem ser considerados como apoio para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 (*Big Data*, *RFID*, computação em nuvem, realidade aumentada/virtual, AGV, óculos inteligentes, produtos eletrônicos e sensores/atuadores) e dos princípios de concepção da Indústria 4.0 (integração horizontal/vertical, dados em tempo real, transparência, flexibilidade, digitalização, consistência da informação, monitoramento, visualização, rastreabilidade e auto-otimização), pois a implementação dessas tecnologias e princípios de concepção requer um certo nível de orientação em relação a processos, fornecedores e clientes, tarefas e tempos previamente definidos. Para os autores, um aspecto importante, e objetivo perseguido pelo *Lean*, é o desenvolvimento e implementação de processos eficientes e sem desperdícios, com padrões definidos e alto foco no cliente. Além disso, as ferramentas do *Lean* também promovem a integração vertical e horizontal dos processos, dentro e fora da organização, o que pode auxiliar nos requisitos de integração da Indústria 4.0.

Na pesquisa realizada por Rossini *et al.* (2019), em 108 empresas europeias de manufatura, nota-se que os maiores níveis de adoção das tecnologias da Indústria 4.0 ocorrem quando as empresas já possuem o *Lean* muito bem implementado. Por meio dessa pesquisa, os autores apresentaram uma inter-relação entre os princípios do *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0 (Quadro 7). Para os autores, essa inter-relação é positiva para implementação das tecnologias da Indústria 4.0, pois, quando as empresas já possuem os princípios *Lean* estabelecidos, seus processos já são projetados, de forma robusta, e as práticas *Lean* são vivenciadas no dia a dia, possibilitando que estabeleçam maior foco na adoção de novas tecnologias, como as da Indústria 4.0.

Quadro 7 – Inter-relação entre o *Lean* e a Indústria 4.0

Princípio do Lean Tecnologias da Indústria 4.0	Integração com Fornecedores	Integração com Clientes	Sistema Pull	Gestão à Vista	Padronização	Fluxo Contínuo	Tempo de Preparo (Set-up Time)	Gestão da Qualidade do Produto e Processo	Desenvolvimento de Pessoas	Melhoria Contínua	TPM
Robotização					X			X			X
RFID	X	X			X	X	X	X	X	X	X
Verificação em tempo real	X	X				X	X	X	X		X
CPS	X	X			X	X	X	X	X	X	X
Realidade Aumentada	X			X				X	X	X	X
Computação em Nuvem	X	X	X	X		X		X	X	X	X
Colaboração com fornecedores/clientes (em tempo real)	X	X	X	X				X	X	X	X
Manutenção preditiva em tempo real	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Inteligência artificial	X	X			X	X	X		X		X
Gestão autônoma da produção								X			X
Automação digital	X	X	X				X	X	X	X	
Sensorização	X	X	X	X		X		X		X	X
Sistemas integrados de engenharia	X	X		X		X	X	X		X	X
Manufatura Aditiva	X	X	X		X			X	X		
Big data	X	X	X		X			X	X		
IoT	X	X	X		X	X		X			X

(traduzido de Rossini *et al.*, 2019)

Para Mayr *et al.* (2018), os métodos do *Lean* devem ser considerados base para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, pois:

- Processos padronizados, transparentes e reproduzíveis são de importância fundamental para a introdução da Indústria 4.0.
- Os tomadores de decisão exigem competências do *Lean* para considerar o valor do cliente e evitar desperdícios.
- Ao reduzir a complexidade do produto e do processo, o *Lean* permite o uso eficiente e econômico das ferramentas da Indústria 4.0.

Baseados nesses pontos, os autores apresentaram uma combinação dos métodos do *Lean* com as tecnologias da Indústria 4.0 (Quadro 8). Com isso, os autores comentam que, quando há uma implementação adequada dos métodos do *Lean*, as tecnologias da Indústria 4.0 podem atuar de forma regular sobre esses métodos, aumentando ainda mais a eficiência da organização.

Quadro 8 – Combinação do *Lean* com a Indústria 4.0

Métodos do Lean Tecnologias da Indústria 4.0	JIT/JIS	Heijunka	Kanban	VSM	TPM			SMED	Gestão à Vista			Poka-Yoke
					1*	2**	3***		5S	Ordenamento	Andon	
Manufatura Aditiva	x					x		x				
Plug & Play												
AGV	x		x									
Interação Homem-Computador			x	x	x				x	x	x	x
Realidade Aumentada/Virtual	x				x			x	x	x		x
Embalagens Inteligentes	x		x									
Autoidentificação	x		x	x	x			x	x	x		x
Memória digital de objetos	x				x			x				x
Digital Twin / Simulação	x	x	x	x		x	x	x	x			
Computação em Nuvem	x			x	x	x						x
Computação em Tempo Real	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Big Data / Análise de Dados	x	x	x	x		x						x
Aprendizagem de Máquina				x	x			x				x

* Manutenção Autônoma, ** Manutenção Planejada, *** Gestão inicial de produtos e equipamentos

(traduzido de Mayr *et al.*, 2018)

Em uma análise de múltiplos estudos de caso, realizada por Ciano *et al.* (2021), os autores identificaram que as práticas ou técnicas da filosofia *Lean* podem ser consideradas habilitadoras para as tecnologias ou princípios de concepção da Indústria 4.0 (Quadro 9).

Quadro 9 – Os efeitos habilitadores do Lean sobre a Indústria 4.0

Área	Técnicas e Práticas do Lean	Efeito Habilitador sobre a Indústria 4.0	Tecnologia ou Característica da Indústria 4.0	Casos Estudados
Gestão da Fábrica	<i>Kaizen</i>	(i) Os eventos <i>Kaizen</i> facilitam a aceitação da implementação da Indústria 4.0 pelos trabalhadores e criam ocasiões compartilhadas para trazer novas ideias (por exemplo, no caso G, uma equipe multifuncional projetou um novo carrinho durante um evento <i>Kaizen</i>)		C; E; F; G; H.
	<i>Kanban</i> / Estratégia <i>Pull</i>	Sem efeitos diretos.		
	<i>Heijunka</i>	Sem efeitos diretos.		
	<i>One-Piece-Flow</i>	(i) Facilita o rastreamento das peças em tempo real, aumentando a transparência.	Integração Vertical	C; E; F; H.
	<i>Just-in-Time</i>	(i) Facilita o rastreamento das peças em tempo real, aumentando a transparência.	Integração Vertical	C; E; H.
	<i>Takt Time</i> <i>Jidoka</i>	Sem efeitos diretos. Sem efeitos diretos.		
Relacionamento com Fornecedores	Fornecedor de Longo Prazo Envolvimento do Fornecedor	(i) O relacionamento com os fornecedores baseado em práticas <i>Lean</i> possibilita a Integração Horizontal. Por um lado, as empresas podem confiar nos fornecedores para compartilhar plataformas sobre o <i>status</i> em tempo real do consumo de material e permitir que eles gerenciem o <i>Kanban</i> eletrônico. Por outro lado, os fornecedores envolvidos estão mais dispostos a prestar esse serviço.	Integração Horizontal	E; H.
Relacionamento com Clientes	Envolvimento do Cliente / Customização	Sem efeitos diretos.		
Gestão da Mão de Obra	Time Multifuncional Comprometimento do Colaborador	(i) Resolução de problemas conduzida em equipe multifuncional e concursos para ideias inovadoras permitem a escolha e a introdução de soluções da Indústria 4.0.		G; H.
Desenvolvimento de Novo Produto	Padronização de Componentes <i>Design</i> para Manufatura	Sem efeitos diretos.		

(traduzido de Ciano *et al.*, 2021)

Quadro 9 – Os efeitos habilitadores do Lean sobre a Indústria 4.0 (cont.)

Área	Técnicas e Práticas do Lean	Efeito Habilitador sobre a Indústria 4.0	Tecnologia ou Característica da Indústria 4.0	Casos Estudados
Processos e Equipamentos de Manufatura	VSM	(i) Permite a identificação das áreas fundamentais para o investimento nas tecnologias I4.0. (ii) Permite que as tarefas que agregam valor sejam padronizadas (utilizando as <i>Job Element Sheets</i> - JES) e visualizadas nos monitores das estações de trabalho. As JES eletrônicas permitem que o operador insira informações atualizadas no MES e ERP promovendo a integração.	Integração Vertical	C; E; F; G; H. B; C; E; F; G; H.
	Mapeamento do Processo	(i) Permite a identificação do fluxo do processo, e portanto dos fluxos de materiais, de informações e do WIP, essenciais ao <i>design</i> do MES / MOM para a integração ao ERP.	Integração Vertical	A; B; C; D; E; F; G; H.
	Redução do Tempo de Preparo (Set-up Time Reduction) - SMED	Sem efeitos diretos.		
	<i>Andon</i>	Sem efeitos diretos.		
	<i>Poka-Yoke</i>	Sem efeitos diretos.		
	Trabalho Padronizado	Sem efeitos diretos.		
	Controle Estatístico do Processo	O conceito de Eficácia Global do Equipamento (Overall Equipment Effectiveness - OEE) define os dados a serem selecionados e analisados, como os dados relacionados à disponibilidade, desempenho e qualidade.	Análise Descritiva	B; C; E; F; G; H.
	TPM	Sem efeitos diretos.		
	Eliminação de Desperdícios / Perdas	(i) PDCA e A3 utilizados para projetar novas ferramentas capazes de facilitar a introdução de tecnologias I4.0 (por exemplo, no estudo de caso G, a técnica A3 foi utilizada para projetar novos carrinhos capazes de facilitar a colaboração de robôs na coleta de placas da máquina de corte).	Robôs Autônomos	G.
	5S e Gestão à Vista	(i) A padronização e otimização do armazém facilita a adoção de <i>smartphones</i> para gerenciar os materiais: sem regras e padrões os <i>smartphones</i> identificariam mais inconsistências que correspondências. (ii) A padronização e otimização do armazém facilita a adoção de óculos de realidade aumentada para gerenciar materiais: sem regras e padrões os óculos de realidade aumentada identificariam mais inconsistências que correspondências.	Escaneamento em Tempo Real com <i>Smartphones</i>	E; H.
Layout	(iii) A padronização e otimização das estações de trabalho e do armazém facilitam o AGV Autônomo no manuseio de materiais	AGV's Autônomos	E; H.	
	(i) No caso E, uma redefinição do <i>Layout</i> em uma célula em linha reta facilitou a rota do AGV autônomo. (ii) No caso D, a introdução de um Robô Colaborativo na célula em forma de U tornou o fluxo mais equilibrado e contínuo.	AGV's Autônomos Robô Colaborativo	 E; D.	

(traduzido de Ciano *et al.*, 2021)

Nessa análise os autores identificaram, por exemplo, que a aplicação de técnicas do *Lean*, como a padronização de locais de trabalho (com revisões do *layout*), 5S e VSM podem auxiliar na introdução de tecnologias, como robôs colaborativos e máquinas inteligentes.

Já na pesquisa realizada por Lorenz *et al.* (2019), observa-se que as práticas do *Lean*, como: especificar o valor do cliente, identificar o fluxo de valor, fluxo contínuo, *pull* e se esforçar para a perfeição, também são consideradas importantes para a introdução das tecnologias da Indústria 4.0, especificamente em relação ao princípio de concepção “digitalização”. Para os autores, como *Lean* trabalha com processos simplificados, facilita a coleta de dados necessários para projetos digitais, reduzindo o tempo de integração de soluções digitais. Os autores relatam ainda sobre o risco de se implementar tecnologias digitais de ponta e negligenciar o propósito central dessas tecnologias, o qual visa apoiar e melhorar os processos existentes de criação de valor. Os princípios, ou práticas *Lean*, garantem um foco permanente no valor para o cliente e na eliminação de desperdícios, facilitando a identificação de tecnologias que suportam esses objetivos. Além disso, quando os princípios, ou práticas *Lean* não são aplicados, pode ocorrer a digitalização dos desperdícios.

Na revisão da literatura realizada por Buer *et al.* (2018), identificou-se a importância de se ter o *Lean* muito bem implementado, antes de iniciar a introdução das tecnologias da Indústria 4.0, pois, segundo a pesquisa, um processo otimizado e sem desperdícios, obtido por meio de uma transformação proporcionada pelo *Lean*, simplifica esforços adicionais para automatizar e digitalizar os processos de uma organização. Um exemplo citado pelo autores é o VSM que pode se tornar ainda mais importante para obtenção de melhorias na empresa, quando combinado com ferramentas da Indústria 4.0, como a IoT e a *Big Data*, na transmissão e gestão dos dados, em tempo real, permitindo uma atualização do VSM, também, em tempo real. Em outros dois exemplos, os autores comentam sobre como os CPS podem ser aplicados em conjunto com o *Jidoka*, tornando essa ferramenta ainda mais autônoma, e como a manufatura aditiva pode tornar o JIT ainda mais eficiente. Observa-se, ainda, que a utilização

de modelagem e controle, em processos de produção padronizados, apresenta maior probabilidade de sucesso, quando já existem os princípios do *Lean* implementados, tornando o ambiente uma base sólida para a construção de uma plataforma de manufatura inteligente.

Já no estudo realizado por Küpper *et al.* (2017), verifica-se a importância de se ter o *Lean* como base para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Segundo os autores, quando as tecnologias da Indústria 4.0 são implementadas em empresas que não possuem ou possuem um baixo nível de *Lean*, os benefícios alcançados podem ser de 10% a 15% em relação à redução de custos. Já em empresas com o *Lean* fortemente implementado, as reduções de custo podem ultrapassar os 40%, além de reduções no inventário em processo de, aproximadamente, 30% e reduções dos custos da baixa qualidade de, aproximadamente, 20%. Para os autores, isso se deve principalmente pela base proporcionada pelos princípios do *Lean* às tecnologias da Indústria 4.0, como:

- **Flexibilidade:** As empresas desejam operações flexíveis, que lhes permitam usar uma única linha de produção para a fabricação de vários produtos. No entanto, os benefícios da flexibilidade são difíceis de capturar, devido, principalmente, ao tempo de preparo do maquinário (*set-up time* ou *changeover time*) para fabricar produtos diferentes. Porém, ao utilizar ferramentas do *Lean*, como a SMED, as empresas podem eliminar atividades que não agregam valor, acelerando significativamente o processo. Com isso, após a implementação das ferramentas do *Lean*, utilizam-se as tecnologias da indústria 4.0, como os CPS, para apoiar, ou melhorar essas atividades, por exemplo, na utilização de novos sensores e softwares, permitindo que as máquinas identifiquem produtos automaticamente e carreguem o programa e as ferramentas adequadas, sem intervenção manual. Dessa forma, com alterações automatizadas, os operadores podem se concentrar na execução de atividades de valor agregado.

- **Produtividade:** Em muitas indústrias de manufatura, quebras e falhas de equipamentos levam a altos níveis de estoque e baixa produtividade. As empresas podem usar métodos do *Lean*, como manutenção autônoma ou preventiva, para aumentar a eficácia geral do equipamento (*Overall equipment effectiveness* - OEE). Na utilização da manutenção autônoma, por exemplo, com o apoio da *Big Data*, as empresas atribuem a responsabilidade por atividades específicas de manutenção "faça você mesmo" aos seus operadores, reduzindo significativamente o tempo de inatividade necessário para corrigir pequenos problemas. Agora, as indústrias estão aproveitando ao máximo esses métodos do *Lean* para adicionar técnicas da Indústria 4.0, como algoritmos de análise avançados e técnicas de aprendizado de máquina, para analisar as enormes quantidades de dados coletados por sensores. Como resultado, obtém-se uma análise de quebras potenciais, antes que elas ocorram. Essas percepções preditivas preparam os operadores para realizar a manutenção autônoma, no momento ideal, reduzindo interrupções, minimizando o tempo de inatividade e reduzindo os custos de substituição.
- **Velocidade:** As empresas enfrentam diariamente a complexidade do planejamento da produção, à medida que procuram aumentar o número de variantes do produto, enquanto reduzem os tamanhos dos lotes. Para auxiliar nesse processo, os operadores utilizam ferramentas, como gestão à vista e outras rotinas diárias, que são considerados elementos centrais da filosofia *Lean*, para reagir aos desvios na produção, identificar problemas e atualizar os funcionários sobre as mudanças necessárias nos planos de produção. Já com essas ferramentas implementadas, as empresas passam a utilizar algoritmos, por meio da *Big Data* e da IoT, para fazer a gestão da produção em tempo real. Dois elementos-chave no uso eficaz desses algoritmos são: a. "torre de controle" (*control tower*) centralizada, que coleta dados e direciona toda a movimentação de materiais, dentro e fora da fábrica e b. uma cadeia de valor integrada horizontalmente.

- **Qualidade:** A capacidade de produção pode ser prejudicada, se os produtos não atenderem às especificações, ou pior, se uma empresa enviar produtos de baixa qualidade para os clientes, o que ocasionará custos mais elevados e um impacto na confiança do cliente. Por esse motivo, ferramentas do *Lean*, como a autoinspeção, a *poka-yoke* e *jidoka*, foram desenvolvidas para reduzir a probabilidade de erros e aumentar a taxa e a velocidade de detecção dos erros. A autoinspeção, por exemplo, pode melhorar o processo de fornecer *feedback* aos engenheiros e operadores, acelerando a detecção de erros e reduzindo o número de defeitos entre 50% e 70%. Assim, com essas ferramentas implementadas, as empresas podem adotar uma abordagem de análise baseada em dados (*Big Data*), além de tecnologias, como a realidade virtual/aumentada para identificar as causas dos erros, fornecendo dados confiáveis e a capacidade de conduzir um rastreamento detalhado.
- **Segurança:** A segurança está entre os indicadores-chave de processo (*Key Process Indicators – KPIs*) de produção mais importantes. Para garantir a segurança do operador, uma abordagem *Lean* utiliza sinais (como a fábrica visual ou gestão à vista) para informar aos operadores por onde eles podem caminhar. Outra abordagem, utiliza o rastreamento detalhado de incidentes e quase acidentes para identificar áreas de melhoria. Com essa filosofia já implementada, as empresas podem usar as tecnologias da Indústria 4.0, como os CPS e a realidade virtual/aumentada, para melhorar a eficácia de tais esforços. Elas podem, por exemplo, equipar os operadores com sensores que os alertarão sobre a presença de gases perigosos, ou a possibilidade de um choque com empilhadeiras, ou caminhões próximos.

Em uma análise realizada por Kolberg e Zühlke (2015), os autores citam que implementar as tecnologias da Indústria 4.0 em empresas que possuem os princípios do *Lean* bem estabelecidos, pode reduzir os riscos de integração, devido ao direcionamento já existente para a integração organizacional. Além disso, os processos de produção no *Lean* são, em comparação com outras

filosofias, mais padronizados, mais transparentes e adequados ao trabalho essencial. Como resultado, eles são menos complexos e suportam a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Com base nessas afirmações, os autores fizeram uma análise da implementação das tecnologias da Indústria 4.0 em ferramentas ou princípios do *Lean*, já solidamente implementadas:

- **Operador Inteligente:** Tendo o método *Andon* como referência, segundo o qual, no caso de falhas, os colaboradores são notificados brevemente, a utilização do Operador Inteligente pode reduzir o tempo, desde a ocorrência da falha até a sua notificação. Equipados com relógios inteligentes, os funcionários recebem mensagens e localizações de erros, em tempo real. Além disso, os CPS podem ser utilizados no reconhecimento de falhas, acionando automaticamente as ações de reparo. Um fluxo contínuo de peças pode ser apoiado por sistemas de assistência, com base em realidade aumentada. As informações sobre os tempos de ciclo no campo visual dos colaboradores (por meio de óculos inteligentes), apoiam o processamento *just-in-time* das mercadorias.
- **Produto Inteligente:** No contexto de processos de melhoria contínua (*Kaizen*), produtos inteligentes podem coletar dados de processos para a análise, durante e após sua produção. Em contraste com a aquisição manual de dados para o VSM, é possível reunir informações individualizadas, por produto e linha de produção, automaticamente. Dessa forma, a aquisição de dados torna-se menos trabalhosa e com dados mais precisos. Além disso, um produto inteligente pode conter informações do *Kanban* para controlar os processos de produção.
- **Máquina Inteligente:** A metodologia *Poka-Yoke*, em que as instalações técnicas auxiliam os funcionários a evitar erros, pode ser apoiada pelos CPS, pois sua capacidade de computação e sensores conectáveis, podem ser integrados de forma rápida e flexível em processos de suporte, sujeitos a falhas. Componentes opticamente idênticos podem ser identificados, via *QR-Code* ou RFID. De acordo com o princípio SMED, o

tempo de preparo deve ser reduzido drasticamente e as tecnologias “*Plug & Produce*” podem transferir o SMED de uma única estação de trabalho, para linhas de produção inteiras.

- Planejador inteligente: Com o planejador inteligente, sistemas como *Kanban*, controle dos tempos de ciclo e transporte de mercadorias, podem se tornar dinâmicos e descentralizados, adotando automaticamente os programas de produção atualizados, por meio da utilização dos CPS.

No estudo publicado por Behrendt *et al.* (2017), os autores identificam os princípios do *Lean*, como base para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Para os autores, princípios como eliminação dos desperdícios e de mapeamento das atividades que não agregam valor, ainda serão fundamentais para as empresas, e as tecnologias da Indústria 4.0, como coleta e gestão de dados (*Big Data*), sensorização, robotização, automação e manufatura aditiva, potencializariam os benefícios desses princípios. Segundo o estudo, quando as tecnologias da Indústria 4.0 são implementadas em empresas com os princípios de *Lean* já implementados, a melhoria de eficiência pode ser de 15% a 20%, a redução do tempo de máquinas paradas pode ser de 30% a 50% e a produtividade pode aumentar entre 40% e 50%. O estudo mostra também que, assim como no *Lean*, o envolvimento da alta liderança e a mudança cultural, seguida do apoio das pessoas, são etapas fundamentais para a implementação da Indústria 4.0. Por fim, o estudo apresenta que, da mesma forma que o *Lean*, é importante ter uma estratégia que abranja a transformação de toda a organização e não apenas de setores.

Já na visão de Rüttimann e Stöckli (2016), o *Lean* é considerado muito mais que apenas uma ferramenta de eliminação de desperdícios ou projetos *Kaizens*. Para os autores, o *Lean* é uma teoria de manufatura abrangente, que pode até ser modelada matematicamente. Na visão deles, essa teoria é composta por um sistema de manufatura de maior desempenho, abordagem de melhoria contínua baseada em pessoas e uma visão sistêmica estratégica de processos baseados em ferramentas, como *Kaizen* e JIT (*just-in-time*). Considerando essa abordagem do *Lean*, os autores afirmam que a implementação consistente dos

princípios do *Lean* é um passo fundamental para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, que viriam como ferramentas de melhorias desses princípios. Como exemplo, os autores citam a utilização dos CPS para potencializar os benefícios de princípios, como o JIT, fluxo contínuo e o *pull*, além da utilização de robôs autônomos na manutenção convencional do *Lean* (TPM), melhorando o desempenho dos sistemas de produção das empresas.

Analisando a pesquisa realizada por Davies *et al.* (2017), nota-se que os autores também consideram o *Lean* como uma filosofia base para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Para eles, o *Lean* cria uma cultura de melhoria contínua, tanto nas funções de liderança quanto na força de trabalho em geral, e, com isso, todos os envolvidos não apenas aceitarão as mudanças, mas as impulsionarão ativamente. Em segundo lugar, é provável que haja uma estrutura de resolução de problemas incorporada, na qual as pessoas aplicam métodos científicos sólidos para implementar soluções sustentáveis para os problemas. E, finalmente, o sistema de produção e serviços, em um ambiente *Lean*, provavelmente será estável, produtivo, eficiente, reduzindo ao mínimo os atrasos, defeitos e rejeições de produção. Por esses motivos, os autores sustentam que um ambiente *Lean* é um capacitador para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como os CPS, que podem ser implementados em ferramentas do *Lean*, como o *Kanban*, a gestão à vista, o TPM, a melhoria contínua e o VSM, alavancando uma mudança radical no desempenho operacional da empresa.

Com a mesma visão de Davies *et al.* (2017), os autores Laaper e Kiefer (2020), consideram o *Lean* como uma filosofia importante para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Para eles, os possíveis benefícios referentes à implementação dessas tecnologias se tornam mais concretos, quando implementados em métodos, ou ferramentas que já trabalham nas melhorias organizacionais, como é o caso do *Lean* e seus métodos, como a eliminação dos desperdícios, o *Kanban*, o TPM, o *Heijunka* e o 3P (Produção, Preparação e Processo), conforme apresentado no Quadro 10.

Especificamente na eliminação de desperdícios, os autores relatam que a aplicação de tecnologias, como sistema de visualização e análise em tempo real, *digital twin*, simulação, realidade aumentada e virtual, aceleram a identificação e mitigação de desperdícios mais rapidamente, fornecendo informações direcionadas e detalhadas diretamente para aqueles que podem reduzir o desperdício. No Quadro 11, os autores avaliam como as ferramentas tradicionais do *Lean* atuam como base para posterior implementação das tecnologias da Indústria 4.0, potencializando os benefícios dessas ferramentas.

Quadro 10 – Lean como Base das Ferramentas da Indústria 4.0

Ferramenta do Lean	Definição	Exemplo de Aplicação	Aplicação da Tecnologia da Indústria 4.0
Kanban	Um mecanismo de sinalização usado para controlar o trabalho e indicar a necessidade de reposição de recursos ou status do processo.	As caixas são preenchidas com componentes em processo em uma estação de trabalho. Uma vez que as peças são consumidas em um nível predeterminado, os operadores das etapas anteriores de fabricação percebem que precisam reabastecer a caixa.	<ul style="list-style-type: none"> • A tecnologia de identificação automática, como o RFID, pode ser aplicada para rastrear peças (unitária) em tempo real, disparando automaticamente a atividade de reabastecimento. • Outras tecnologias da Indústria 4.0, como o <i>digital twin</i> e a aprendizagem de máquina, podem simular e otimizar as quantidades de <i>bin kanban</i>, como estoque e frequência de entrega.
Manutenção Produtiva Total	Um sistema que otimiza o desempenho do equipamento e fluxos de trabalho.	A MPT é realizada periodicamente, com base no tempo de execução, ciclos e outros critérios utilizados para realizar a manutenção nos equipamentos, antes que a falha ocorra.	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores avançados e algoritmos de aprendizagem de máquina permitem realizar a manutenção preditiva, em que o equipamento é atendido com base nos dados do sensor do equipamento (por exemplo, vibração, força, temperatura). Isso permite estender os intervalos de manutenção e, ao mesmo tempo, reduzir os eventos de falha.
Heijunka	Uma metodologia de programação tradicional para ambientes multiprodutos, em que a produção é "nivelada", alternando estrategicamente o mix de produtos a serem fabricados em um determinado período.	Estabelecer o "tamanho" das execuções de produção no <i>Heijunka</i> é feito periodicamente devido à complicação de calcular o tamanho ideal de execução para cada etapa do <i>Heijunka</i> .	<ul style="list-style-type: none"> • A análise avançada de dados (<i>Big Data</i>) pode estabilizar o planejamento, usando dados históricos de execuções de produção anteriores, criando programações otimizadas com base na disponibilidade da máquina, qualidade do processo e requisitos de recursos.
3P (Preparo, Produção e Processo)	Um processo colaborativo, no qual equipes multifuncionais usam representações físicas dos ambientes de manufatura para criar novos processos e produtos.	Como parte de um exercício 3P, as empresas costumam construir modelos de papelão de futuras linhas de fabricação.	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos conectados à IoT e tecnologia avançada para o agrupamento de dados de processo e produção (<i>Big Data</i>), permitem que os profissionais criem e projetem com base em verdadeiros "pontos chave". • A realidade virtual/aumentada da linha de produto ou processo recém-desenvolvido rende muitos benefícios, incluindo, mas não se limitando à interação com contribuidores que não podem estar fisicamente presentes (sites de fabricação parceiros, fornecedores de equipamentos de máquina, etc.). • A equipe pode usar a tecnologia <i>digital twin</i> para a análise de dados, simulando os processos para solucionar problemas de projeto, otimizar parâmetros e explorar oportunidades adicionais de melhoria.

(traduzido de Laaper e Kiefer, 2020)

Quadro 11 – Como o *Lean* digital pode melhorar o *Lean* tradicional na redução de desperdícios

Tipo de Desperdício	O que o <i>Lean</i> Identifica e Mitiga	Como o <i>Lean</i> Digital Melhora o <i>Lean</i> Tradicional
Superprodução	O <i>Lean</i> tradicional mitiga a superprodução causada pela assincronização entre a demanda e o fornecimento, incluindo sinais de demanda atrasados e restrições rígidas de processos.	O <i>Lean</i> digital pode fornecer visibilidade em tempo real do fluxo de valor para ajustar a capacidade de maneira proativa, evitando a produção desnecessária.
Inventário	A instabilidade em todo o fluxo de valor é frequentemente absorvida com estoque adicional. Os métodos <i>Lean</i> permitem que os produtos sejam fabricados apenas na quantidade e no tempo necessários.	O <i>Lean</i> digital pode aprimorar as operações com a visibilidade em tempo real do estoque de trabalho, em andamento e em todo o processo de produção, identificando o acúmulo inesperado de estoque.
Defeitos	Projeto de produto e controle de processo deficientes aumentam os defeitos em todo o fluxo de valor, causando retrabalho ou refugo. O <i>Lean</i> tradicional pode ajudar a reduzir defeitos, estabelecendo padrões na forma como os ativos são mantidos, como os processos são definidos e como os produtos são projetados.	O <i>Lean</i> digital ajuda a identificar o ativo, a etapa do processo ou a característica do produto que está causando defeitos e, conseqüentemente, reduzindo o desempenho.
Superprocessamento	O <i>Lean</i> tradicional pode ajudar a evitar o processamento não requerido pelo cliente, executado em todo o fluxo de valor, como a superinspeção ou as tolerâncias desnecessárias.	O <i>Lean</i> digital conecta e integra o ciclo de vida de um produto (e o fluxo de valor) por meio da <i>digital twin</i> : uma linha contínua de desenvolvimento, produção e uso de espelhos de dados que se estendem desde o <i>design</i> inicial até o final da vida útil do produto.
Tempo de Espera	Operações desequilibradas, gargalos, tempo de inatividade e planejamento de produção inadequado aumentam o tempo de espera ao longo do processo, em que colaboradores, materiais e ativos não estão agregando valor. As abordagens <i>Lean</i> tradicionais ajudam a reduzir o tempo de espera.	O <i>Lean</i> digital reduz a espera por meio do reencaminhamento dinâmico de operações, com base em atualizações no status de ativos em tempo real, identificação rápida de gargalos e múltiplas simulações de cenários otimizados.
Movimentos do Operador	O <i>design</i> deficiente das linhas e células de produção aumenta o movimento desnecessário para que os operadores concluem as tarefas de valor agregado. Os processos <i>Lean</i> diminuem ou eliminam esses movimentos adicionais que não agregam nenhum valor ao produto e contribuem para tempos de produção mais longos.	O <i>Lean</i> digital pode melhorar o projeto de layout e de equipamentos, por meio da análise de dados de desempenho ou do uso de simulações de realidade virtual e aumentada, otimizando a movimentação do operador.
Transporte	O <i>Lean</i> reduz os processos não lineares - ou processos espalhados pelo chão de fábrica - que exigem o transporte de materiais de um armazenamento distante até o ponto de uso.	O <i>Lean</i> digital pode quantificar o tempo de transporte necessário por produto ou processo, permitindo a identificação de oportunidades para otimizar e organizar melhor o chão de fábrica.

(traduzido de Laaper e Kiefer, 2020)

A partir dessa análise, o estudo aponta que, quando se implementam as tecnologias da Indústria 4.0 em método ou ferramentas do *Lean*, pode-se alcançar uma melhoria de 10% a 20% referentes à utilização dos ativos, uma melhoria na qualidade de aproximadamente 10% a 35%, uma melhoria na segurança e sustentabilidade de 3% a 10%, resultando em uma redução de custos de 20% a 30% (Figura 8).

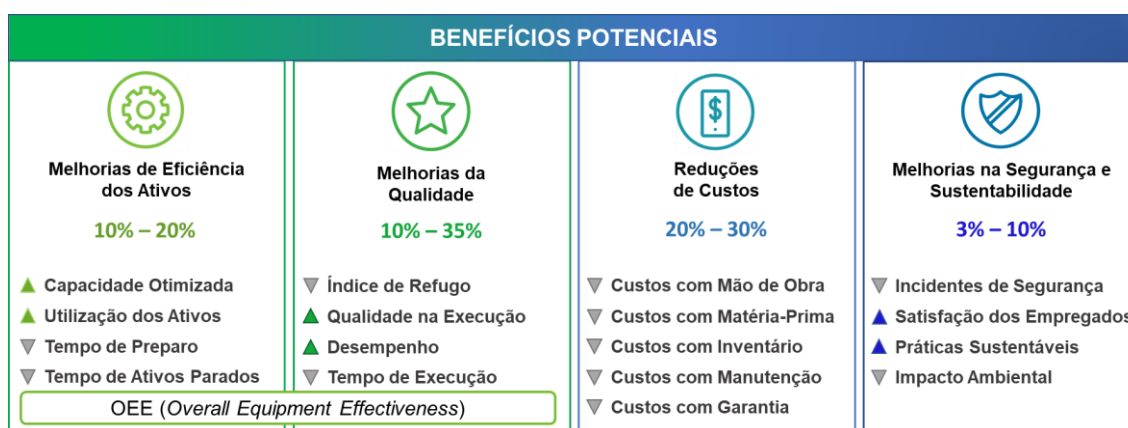


Figura 8 – Benefícios da implementação da Indústria 4.0 no *Lean*
(traduzido de Laaper e Kiefer, 2020)

Na pesquisa realizada por Eleftheriadis e Myklebust (2016), observa-se que a utilização de tecnologias da Indústria 4.0, como CPS e Big Data, pode fortalecer ainda mais a Gestão da Qualidade, considerada um princípio importante da filosofia *Lean*. Segundo os autores, quando as empresas contam com um sistema de Gestão da Qualidade bem implantado, as tecnologias da Indústria 4.0 podem auxiliar no objetivo referente à busca do Zero Defeito. Para tanto, os autores citam que as tecnologias da Indústria 4.0 podem atuar de forma inteligente e preventiva em processos complexos, tornando-os ainda mais robustos.

No trabalho realizado por Tortorella *et al.* (2020), os autores apresentam uma análise de como as tecnologias da Indústria 4.0 podem atuar de forma colaborativa nos componentes do VSM. Para eles, as tecnologias, como Manufatura Aditiva, Big Data, Robôs Colaborativos, RFID, Aprendizagem de Máquina, Inteligência Artificial, Processos Remotos, não somente aprimoram e beneficiam a execução de um VSM, mas também mudam as diretrizes dessa ferramenta, tornando-a mais robusta e alinhada com a era da Quarta Revolução Industrial.

Já Powell *et al.* (2018), entendem que, quando as empresas possuem os princípios do *Lean* como base, a utilização das tecnologias da Indústria 4.0 podem aprimorar ainda mais esses princípios, potencializando os resultados do

Lean. Para os autores, as funcionalidades das tecnologias da Indústria 4.0 podem apoiar basicamente dois constructos do *Lean*: Sistema *Just-in-Time* (e o *Jidoka*) e Respeito pelo Sistema Humano (Quadro 12).

Quadro 12 – Funcionalidades habilitadoras das tecnologias da Indústria 4.0

Constructos do Lean	Funcionalidades habilitadoras das tecnologias da Indústria 4.0
Sistema <i>Just-in-Time</i> (e <i>Jidoka</i>)	
Redução de custo por meio da eliminação de desperdício	A análise de dados (<i>Big Data</i>) fornece maneiras novas e inovadoras de planejar e executar a produção e coordenar a cadeia de suprimentos para apoiar o princípio <i>Just-in-Time</i> .
Retirada / Entrega de materiais por processos subsequentes	A conectividade em toda a empresa, mediante uma plataforma de análise de dados (<i>Big Data</i>), fornece sinalização em tempo real para produção e para a equipe de reposição.
Produção e transporte de lote único	As ferramentas web, para a análise do chão de fábrica, fornecem infraestrutura adequada para "rastrear" o fluxo de lote único, fornecendo informações em tempo real e visibilidade das operações de produção. Os AGVs fornecem funcionalidade para transporte automático de unidades individuais de trabalho, sem a necessidade de construir linhas de transporte físico.
Nivelamento da produção	Por meio da adoção de tecnologias inteligentes de automação e análises com o auxílio da <i>Big Data</i> , o <i>Heijunka</i> se torna muito mais realizável, permitindo maiores recursos de otimização, de planejamento e agendamento de tarefas, que agora são suportados pelo monitoramento em tempo real. Isso permite pequenos ajustes na programação devido à eventos inesperados ou imprevistos na produção, bem como turbulência na demanda real versus previsão.
Eliminação de desperdícios de superprodução	A plataforma de análise de dados (<i>Big Data</i>) fornece visibilidade remota, e em tempo real, do status das operações, evitando e destacando as possíveis causas de desperdício, como a superprodução.
Controle de anormalidades	O teste em linha de produtos usando máquinas automatizadas de medição por coordenadas (CMMs), e a subsequente digitalização da documentação de controle de qualidade, elimina a carga das tarefas manuais. A automação inteligente de tarefas manuais que produzem altos níveis de refugo e retrabalho leva a economias significativas.
Respeito pelo Sistema Humano	
Utilização total das capacidades dos trabalhadores	A plataforma de <i>e-learning</i> oferece um ambiente digital (ou seja, um laboratório virtual), combinado com um laboratório físico, para o treinamento de operadores, acelerando o processo de qualificação e requalificação.
Eliminação de movimentos (desperdícios) dos trabalhadores	Os AGVs estão apoiando os operadores na redução de seus movimentos desnecessários (sem valor agregado) dentro da fábrica.
Considerações para a segurança dos trabalhadores	O objetivo principal da plataforma de <i>e-learning</i> é garantir que todos os operadores sejam bem treinados nos procedimentos de segurança de suas respectivas áreas de atuação, e não apenas em procedimentos físicos de produção e montagem.
Exibição Automática da habilidade dos trabalhadores	A combinação da plataforma <i>e-learning</i> e do laboratório físico suporta um programa de formação por competências, permitindo a avaliação dos operadores nos seus conhecimentos, aptidões e na aplicação desses conhecimentos, para a realização de diferentes instruções de trabalho.

(traduzido de Powell *et al.*, 2018)

Saxby *et al.* (2020), por sua vez, desenvolveram um estudo em que analisam a importância da filosofia *Lean* para a implementação da Indústria 4.0. Nesse

estudo, os autores citam que o Sistema *Pull*, por exemplo, pode ser considerado uma importante ferramenta de apoio para princípios de concepção da Indústria 4.0, como as Fábricas Inteligentes e os Produtos Inteligentes. De acordo com os autores, os componentes do sistema *Pull*, como o *Kanban*, o *Just-In-Time* e o Inventário Zero podem ser utilizados como ferramentas base para uma futura implementação das tecnologias da Indústria 4.0, facilitando a digitalização das empresas.

Romero *et al.* (2018) citam em seu estudo que a identificação e eliminação sistemática de desperdícios é um dos princípios fundamentais do *Lean*, que auxilia as empresas a se tornarem cada vez mais eficientes e lucrativas. Para os autores, as tecnologias da Indústria 4.0 podem auxiliar na digitalização desse princípio do *Lean*, proporcionando ainda mais benefícios para as empresas. A IoT, por exemplo, oferece novas oportunidades para capturar dados do mundo físico, a fim de criar registros digitais para apoiar de forma inteligente o planejamento e o controle da produção, evitando desperdícios. Já a Big Data pode oferecer recursos de otimização na linha de produção, reduzindo ou eliminando os tempos de espera e filas para os recursos de produção. Com isso, os autores mencionam que a digitalização dos fluxos de informação, bem como a captura de dados do mundo físico, pode oferecer novas oportunidades para visualizar e operar toda a empresa, de maneira remota.

Na visão de Balaji *et al.* (2020), o *Lean* é uma técnica de melhoria que se concentra na necessidade real do cliente, evitando o desperdício e sendo construído no sistema de manufatura. Para os autores, o VSM é uma ferramenta importante do *Lean*, que auxilia na melhoria contínua do sistema de manufatura, e a introdução de tecnologias da Indústria 4.0, como a IoT, pode atribuir ainda mais vantagens a essa ferramenta, como, por exemplo, o monitoramento inteligente e em tempo real das operações, possibilitando uma configuração (ou reconfiguração) autônoma da manufatura, além do monitoramento das métricas e dos resultados dos processos do chão de fábrica.

Com visão similar, os autores Lugert *et al.* (2018) comentam que o VSM é uma ferramenta do *Lean* amplamente conhecida e utilizada na melhoria dos sistemas

de manufatura. Segundo os autores, a introdução das tecnologias da Indústria 4.0, como Simulação, Análise de Dados (Big Data), RFID e a Realidade Virtual, podem trazer benefícios, como o aumento da produtividade, flexibilidade, transparência e dinamismo, uma vez que o VSM pode ser atualizado de forma autônoma e em tempo real, proporcionando mais dados aos empregados para a tomada de decisão.

Na pesquisa de Idris *et al.* (2020), observa-se que ferramentas do *Lean*, como o *Kanban*, podem ser utilizadas como base para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0, como a IoT, com o objetivo de agilizar a transferência das informações e dos dados, para o planejamento e programação da produção entre empresas. Para os autores, esse compartilhamento de dados, no planejamento e na programação da produção, pode reduzir o tempo de preparação e entrega do produto, aumentando a vantagem competitiva das empresas.

Lugert *et al.* (2018) também comentam sobre o VSM em sua pesquisa, afirmando que a sua utilização é muito comum em empresas de manufatura, com o objetivo de aumentar a transparência e apoiar melhorias dentro do processo de produção. Na pesquisa realizada por eles, observa-se que as tecnologias da Indústria 4.0, como Simulação e Análise de Dados em Tempo Real, podem auxiliar na evolução do VSM, adaptando-o para as novas mudanças e tendências tecnológicas, no ambiente de negócios. Segundo os autores, essa abordagem digital do VSM possibilitará o desenvolvimento e apresentação de um modelo integrado de dados, com a utilização de diferentes ferramentas para a análise e otimização do fluxo de valor, por exemplo, por meio de uma representação gráfica do fluxo de valor atual, e uma comparação automatizada do fluxo de valor futuro, automatizando também a análise de dados para aprender com o passado e fazer simulações do estado futuro.

Já a revisão sistemática da literatura realizada por Pagliosa *et al.* (2021), mostra que o VSM pode ser melhorado por meio da utilização das tecnologias da Indústria 4.0, como a IoT e os CPS. De acordo com a pesquisa, essas tecnologias podem desempenhar um papel fundamental na troca e transmissão

de dados necessários para conectar a fábrica e, por isso, podem fornecer dados mais precisos de todo o fluxo de valor para que as decisões gerenciais priorizem as iniciativas de melhoria contínua, com base em cenários mais realistas.

Já na análise realizada por Rosin *et al.* (2019), nota-se que determinados princípios do *Lean* podem atuar, de forma ainda mais eficiente, quando ocorre a incorporação de tecnologias da Indústria 4.0. Em alguns exemplos citados pelos autores, observa-se que a IoT e a Simulação podem melhorar o fluxo contínuo, trabalhando, por exemplo, na detecção de gargalos, ou permitindo que os sistemas ajustem autonomamente o planejamento da produção. Outra relação apontada pelos autores, refere-se à eliminação de desperdícios, com o auxílio da IoT, em que as empresas podem se beneficiar do compartilhamento de informações em tempo real para reduzir ou eliminar atividades desnecessárias. Por fim, os autores citam que a gestão à vista pode ser melhorada também, por meio do uso da IoT, pois a integração dos sistemas de chão de fábrica pode facilitar o compartilhamento de informações e a criação do mapeamento de valor, obtendo informações sobre o estado do sistema produtivo, em tempo real, e disponibilizando aos colaboradores informações precisas de toda a operação.

Huang *et al.* (2019) afirmam que as ferramentas de monitoramento, como VSM, auxiliam os responsáveis pela tomada de decisão a capturar, com eficiência, os processos que não agregam valor no chão de fábrica. De acordo com os autores, essa característica do VSM pode se tornar ainda mais eficiente, por meio da aplicação de tecnologias da Indústria 4.0, como é o caso dos CPS e do RFID. Para eles, a utilização dessas tecnologias torna o sistema produtivo menos complexo e mais flexível, permitindo uma atualização do VSM, em tempo real e de maneira virtual, tornando toda a operação mais transparente para a força de trabalho.

Na visão de Butt (2020), o princípio do *Lean* referente à eliminação de desperdícios pode ser melhorado, por meio da implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como a Manufatura Aditiva, Simulação e por meio do princípio de concepção Integração Vertical / Horizontal. Para o autor, essas tecnologias e princípio de concepção podem auxiliar ainda mais na identificação e eliminação

de desperdícios, proporcionando às empresas um melhor desempenho, uma redução nas ineficiências e nos custos, aumentando a flexibilidade e a lucratividade.

Lai *et al.* (2019) apresentam um estudo em que analisam quais tecnologias da Indústria 4.0 podem ser incorporadas ao princípio de eliminação de desperdícios do *Lean*. Segundo os autores, é fundamental que as empresas tenham esse princípio implementado de maneira robusta, pois as tecnologias, como CPS, Big Data, Interação Homem-máquina, Computação Visual e a IoT podem desempenhar um papel muito importante na eliminação de desperdícios, como a superprodução, espera, transporte, excesso de processamento, estoque, movimento desnecessário e defeitos. Para eles, a integração dessas tecnologias à filosofia *Lean*, contribui para o desenvolvimento de fábricas inteligentes.

Já no trabalho realizado por Peças *et al.* (2021), constatou-se que as tecnologias da Indústria 4.0 como IoT, Big Data e Inteligência Artificial podem auxiliar em melhorias operacionais, quando implantadas em processo com a filosofia de melhoria contínua já implementada. Na pesquisa realizada por Saad *et al.* (2021), verificou-se que as práticas *Lean* podem ser utilizadas como base para a implementação de nove tecnologias da Indústria 4.0, como IoT, Aprendizagem de Máquina, Robôs Colaborativos, Realidades Aumentada e Virtual, Inteligência Artificial, Sistemas Físico-Cibernéticos, Computação em Nuvem e Big Data. Para os autores, quando essas tecnologias são implementadas em práticas *Lean*, pode-se observar ganhos operacionais mais altos para as empresas.

Em uma análise similar, Salvadorinho e Teixeira (2021) identificaram em sua pesquisa que as práticas *Lean* podem auxiliar na implementação das tecnologias da Indústria 4.0, pois elas desenvolvem um comportamento corporativo sólido e processos robustos para a implementação dessas tecnologias. Além disso, o *Lean* proporciona a padronização de processos, o que auxilia na implementação e determinadas tecnologias (como os CPS). Por fim, os autores citam que as práticas *Lean* provêm a transparência e a integração com parceiros de negócio, facilitando a implementação e desdobramento das tecnologias da Indústria 4.0.

Wagner *et al.* (2017) consideram as características da Indústria 4.0 como ferramentas estabilizadoras dos processos do *Lean*. Para os autores, as tecnologias e Princípios de Concepção da Indústria 4.0, como Sensorização, Computação em Nuvem, Big Data/*Analytics*, Integrações Vertical e Horizontal e Realidades Virtual/Aumentada, podem causar efeitos muito positivos em princípios do *Lean*, como o 5S, *Kaizen*, *Just-in-Time*, *Jidoka*, *Heijunka*, Padronização, *Takt Time* (Fluxo), *Pull*, Separação Homem-Máquina, Trabalho em Equipe e Redução de Desperdícios, aumentando, de forma significativa, a eficiência das operações da empresa. Para tanto, os autores desenvolveram o Quadro 13, indicando quais princípios do *Lean* apresentam maior relação com determinadas tecnologias da Indústria 4.0.

Quadro 13 – Matriz de Impacto ou Relação entre os Princípios do *Lean* e as Tecnologias e Princípios de Concepção da Indústria 4.0

	Sensores e Atuadores	Computação em Nuvem	Big Data	Análise de Dados	Integração Vertical	Integração Horizontal	Realidade Virtual	Realidade Aumentada
5S	+	+	+	+	+	+	++	+++
<i>Kaizen</i>	+	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Just-In-Time</i>	++	++	+++	+++	+++	++	+	++
<i>Jidoka</i>	+	+++	+++	+++	++	++	+	+
<i>Heijunka</i>	++	++	+++	+++	+++	++	++	+
Padronização	++	+++	+++	+++	++	++	+++	+++
<i>Takt Time</i>	+	+	+++	+++	+++	+++	+	+
<i>Pull</i>	++	+	+	+	+++	+++	+	+
Separação Homem-Máquina	+	+	+	+	+	+	+++	+++
Trabalho em Equipe	+	+	+	+	+	+	+++	+++
Redução de Desperdício	+	+	++	+++	+++	+++	+	+

(traduzido de Wagner *et al.*, 2017)

Shahin *et al.* (2020) relatam que a filosofia *Lean* está muito bem difundida em grande parte das empresas de manufatura, de forma global. Para os autores, a disseminação do *Lean* auxiliará as empresas na implementação das tendências tecnológicas apresentadas pelo conceito da Indústria 4.0, garantindo a

manutenção da competitividade. Mediante essa análise, eles desenvolveram um estudo em que avaliam quais princípios ou ferramentas do *Lean* podem melhor absorver os resultados positivos das tecnologias da Indústria 4.0, como apresentado no Quadro 14.

Quadro 14 – Matriz de Relação entre o *Lean* e a Indústria 4.0

Tecnologias da Indústria 4.0	Ferramentas ou Princípios do <i>Lean</i>										
	<i>Pull</i>	<i>Poka-Yoke</i>	<i>Andon</i>	SMED	<i>Jidoka</i>	VSM	CI	<i>Kaizen</i>	TPM	<i>Heijunka</i>	5S
Big Data	x	x		x			x		x		
RFID	x	x		x	x						
Computação em Nuvem	x	x					x		x		
Realidade Aumentada/Virtual											x
Sensor/Atuador					x		x	x	x		
Dados em Tempo Real	x		x		x	x					
AGV											
Dispositivos Eletrônicos	x		x								
Redes Sem Fio	x				x	x	x				
Interação Homem-Máquina		x			x			x	x	x	x

(traduzido de Shahin *et al.*, 2020)

Em uma pesquisa similar à de Shahin *et al.* (2020), Valamede e Akkari (2020) citam que a integração entre a filosofia *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0 pode auxiliar as empresas a alcançarem seus objetivos organizacionais, possibilitando que elas permaneçam competitivas, perante uma concorrência digitalizada. Segundo as autoras, essa integração potencializará a eliminação dos desperdícios nos processos produtivos, agilizará o fluxo produtivo, facilitando a digitalização das etapas de fabricação e enfatizando o controle visual e transparente, autonomizando a identificação de falhas e maximizando o desempenho da produção. Com isso, elas desenvolveram o Quadro 15 em que apresentam a relação entre o *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.

Quadro 15– Análise da Relação entre o *Lean* e a Indústria 4.0

Ferramentas do <i>Lean</i>	Tecnologias da Indústria 4.0						
	Big Data	AGVs	Manufatura Aditiva	Computação em Nuvem	Segurança Cibernética	Simulação	Realidade Aumentada
JIT	x	x	x	x			x
<i>Kanban</i>	x	x				x	
<i>Poka-Yoke</i>		x		x	x		x
VSM	x			x		x	
<i>Kaizen</i>	x			x		x	x
TPM	x	x	x	x		x	x

(traduzido de Valamede *et al.*, 2020)

No estudo realizado por Satoglu *et al.* (2017), é feita uma análise sobre quais princípios ou ferramentas do *Lean* podem servir como base para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 e como essas tecnologias podem trazer ainda mais benefícios para o *Lean*. Primeiramente, os autores fazem uma análise específica sobre o princípio de eliminação de desperdícios, na qual eles identificam que as tecnologias, como Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada, Simulação/Virtualização, Robotização, IoT, Big Data e Computação em Nuvem, podem proporcionar maiores benefícios para aquelas empresas que já possuem uma cultura de eliminação de desperdícios bem implementada. Já para os outros princípios do *Lean*, os autores comentam, por exemplo, que a manufatura de célula pode apresentar um desempenho ainda melhor, quando integrada a tecnologias, como análises de dados (Big Data) e Robotização. O mesmo pode ocorrer com a redução do tempo de preparo (*set-up time reduction*), que pode ser ainda mais eficiente, por meio de tecnologias, como RFID e Sensorização. Os autores afirmam ainda que os princípios, como a Gestão da Qualidade, TPM, Fluxo, *Kanban*, *Pull*, Desenvolvimento de Fornecedores e *Jidoka*, podem ter resultados ainda mais representativos, quando apoiados por tecnologias como a IoT, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada e os CPS.

Pekarcikova *et al.* (2020) são mais específicos em seu estudo e avaliam como o *Kanban* pode se tornar ainda mais eficiente, por meio da implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Para os autores, a integração dos CPS e do RFID ao *Kanban*, pode deixar essa prática ainda mais eficiente, proporcionando benefícios como:

- Dispositivos com transmissão de sinal em tempo real, possibilitando a visibilidade total dos processos que fazem parte do sistema *Kanban*.
- Introdução de um sistema integrado de câmeras e contêineres equipados com CPS, enviando dados diretamente para o fornecedor.
- Contêineres equipados com sensores que transmitem dados em tempo real, monitorando o nível de estoque e outros dados, como temperatura, pressão do ar, vibração, poeira, etc.
- Integração vertical no sistema de informação empresarial.

- Tomada de decisão descentralizada e autorregulação por meio dos CPS.
- Virtualização e simulação de processos.
- Introdução de sistemas autônomos de transporte.

Também em um formato mais específico, Romero *et al.* (2019) citam o *Jidoka* como uma ferramenta do *Lean* que pode ser considerada apoio para a introdução das tecnologias da Indústria 4.0, como os CPS e a IoT, possibilitando que essa ferramenta apresente um desempenho ainda melhor, por meio de sua digitalização. Na visão dos autores, um *Jidoka* digitalizado permite que as empresas lidem, de forma mais efetiva, com os desperdícios e produtos defeituosos, apresentando maior flexibilidade e automação, características necessárias para uma produção competitiva de alto *mix* e baixo volume.

Em outro trabalho, Romero *et al.* (2019) abordam o princípio da Gestão da Qualidade, que também pode ser considerado como base para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como a Modelagem Avançada, a Simulação, a Big Data e a Visão de Máquina. Para os autores, a integração dessas tecnologias a esse princípio do *Lean*, pode trazer benefícios como maiores níveis de criatividade humana, inovação e uma capacidade colaborativa para resolução de problemas.

Em mais um trabalho, Romero *et al.* (2020) afirmam que os gerentes que atuam com a filosofia *Lean*, concordam sobre a importância da conexão de todos os níveis de gestão, com o chão de fábrica, pois é onde se cria o valor da operação. Para eles, uma forma importante de realizar essa integração vertical é por meio das *Gemba Walks*. Contudo, os autores avaliam que o formato do *Gemba* está se adaptando às novas tecnologias, como as realidades aumentada e virtual, os CPS, a Big Data e a IoT, e essas tecnologias podem trazer benefícios, no contexto do chão de fábrica, relativos à solução de problemas e melhoria contínua, unindo o tempo e espaço e permitindo que os gestores tenham maior amplitude na observação das operações de fábrica.

No trabalho desenvolvido por Ma *et al.* (2017), observa-se que os autores abordam o *Jidoka* como um dos princípios do *Lean* que pode ser considerado

habilitador para as tecnologias da Indústria 4.0. Nesse contexto, eles relatam que os CPS podem ser integrados ao *Jidoka*, transformando-o em um *Jidoka* Inteligente, com o objetivo de trazer melhorias, como, por exemplo, uma análise de dados de produção, de maneira ágil e remota, e maior flexibilidade nas operações da empresa.

Já na pesquisa realizada por Sordan *et al.* (2020), são identificados os princípios do *Lean* apoiam a introdução de determinadas tecnologias da Indústria 4.0 e se beneficiam dessas tecnologias. Como resultados, os autores apresentam que o VSM pode ser integrado à Big Data, apresentando informações em tempo real, não detectadas anteriormente. A Gestão da Qualidade pode ser integrada aos CPS e à Big Data, realizando uma medição de desempenho em tempo real. O *Pull* pode ser integrado a controles digitais, permitindo a identificação em tempo real das quantidades de itens consumidos pela produção. O *Poka-Yoke* pode ser integrado aos CPS e a robôs avançados, evitando a ocorrência de problemas, de forma autônoma. Por fim, os autores afirmam que a Padronização pode ser integrada à Realidade Aumentada, melhorando, por exemplo, a qualidade da inspeção no recebimento de materiais, pois essa tecnologia pode otimizar a tarefa, por meio de imagens 3D, holograma e vídeos instrutivos.

Outros autores citam que existem interações entre o *Lean* e a Indústria 4.0, porém eles não identificam o *Lean* como filosofia base para a implementação das tecnologias e dos princípios de concepção da Indústria 4.0, portanto, não abordam os riscos, os desafios, ou as oportunidades referentes ao não se atentar ao *Lean* para a implementação da Indústria 4.0. Bertolini *et al.* (2019), observam que as tecnologias da Indústria 4.0, como CPS, comunicação *end-to-end*, assistentes virtuais, realidade aumentada, Identificação por RFID, *digital twins* e o compartilhamento de informação, são as que apresentam maior possibilidade de apoiar o avanço tecnológico dos princípios do *Lean*. Para Enke *et al.* (2018), o *Lean* pode se beneficiar das tecnologias da Indústria 4.0 em, especificamente, quatro áreas:

- A digitalização melhora a produção com relação à demanda do cliente, passando por mudanças disruptivas, por meio de modelos de negócios digitais.
- Os dados, em tempo real, criam novas oportunidades para os métodos existentes no *Lean*.
- A digitalização ajuda a estabelecer o *Lean* em novas áreas.
- O produto conhece o ambiente do *Lean* e pode controlá-lo.

Já Kolberg *et al.* (2016) avaliam que as tecnologias (ou soluções) da Indústria 4.0 podem ser utilizadas para potencializar os princípios do *Lean*, trazendo benefícios para ambas as filosofias e elevando o *Lean* para um patamar mais tecnológico, chamado de *Lean Automation* (Automação do *Lean*).

De forma mais específica, Menanno *et al.* (2019) indicam que as tecnologias da Indústria 4.0 podem auxiliar no desenvolvimento das ferramentas do *Lean*, como é o caso do *Kanban*. Os autores argumentam que a implementação de sistema *Kanban* eletrônico (o *e-Kanban*) permite ultrapassar os limites do *Kanban* e reduzir a quantidade de materiais presentes nas linhas de montagem. Em comparação com o método *Kanban* convencional, há uma economia considerável no tempo de abastecimento das linhas, uma vez que o operador não precisa realizar uma rota completa para coletar as etiquetas referentes aos materiais que estão prestes a terminar, considerando que a solicitação de materiais é exibida, em tempo real, em um dispositivo eletrônico. Além disso, o *e-Kanban* apresenta, como benefícios, a possibilidade de conhecer o estoque real da fábrica em todas as estações, a qualquer momento, e a redução associada ao trabalho em processo (*Work-in-Process* – *WIP*). Observa-se ainda que o sistema minimiza os erros e imprecisões presentes no sistema operacional atual, o qual utiliza formulários em papel.

Também, de forma aprofundada, Hambach *et al.* (2017) propõem um modelo digitalizado de melhoria contínua (ciclo PDCA), a partir da integração com soluções da Indústria 4.0. Assim, a melhoria contínua digital pode oferecer mais possibilidades para uma melhoria mais eficiente do processo. Para os autores,

o modelo proposto não é um método com o qual a ferramenta de melhoria contínua se torna independente da produção real que pretende melhorar. Os processos devem ser sempre inspecionados, no local, para que o princípio de “ida ao *Gemba*” permaneça em vigor no futuro. Portanto, o PDCA combinado com os elementos da Indústria 4.0, visa apoiar os funcionários em seu trabalho, com relação à sua criatividade na resolução de problemas, e não substituí-los.

Existem ainda outras influências referentes à implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como aquelas relacionados à segurança cibernética, envolvida no compartilhamento de dados entre empresas, uma vez que a integração horizontal e a integração do ciclo de vida do produto, essenciais no conceito Indústria 4.0, têm como premissa o compartilhamento de dados, além das fronteiras da empresa (CULOT *et al.*, 2019; RUBIO *et al.* 2018). Observa-se também uma preocupação com o preparo da mão de obra que trabalhará com as tecnologias da Indústria 4.0, de forma que, para alcançar o potencial máximo dessas tecnologias, é fundamental possuir uma mão de obra preparada (MARNEWICK e MARNEWICK, 2019; DI PIERRO *et al.*, 2019). Nota-se ainda uma preocupação referente à conectividade entre as tecnologias, pois, considerando que muitas empresas já possuem certo nível tecnológico, tem-se a questão sobre como essas tecnologias se conectarão com as tecnologias da Indústria 4.0 (MOHAMED e AL-JAROODI, 2019; ALLADI *et al.* 2019). Outro ponto citado refere-se às incertezas por parte das empresas com relação aos benefícios do conceito, principalmente no que se refere ao tempo para alcançá-los e ao montante financeiro a ser investido (RÜTTIMAN e STÖCKLI 2016).

2.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DO LEAN

A identificação e medição dos princípios e práticas, na implementação do *Lean*, seguidas da avaliação do seu nível de implementação, ou maturidade, podem ser considerados os passos adequados para a efetiva eliminação, ou minimização de desperdícios, melhoria de eficiência e real ganho financeiro nas organizações. Para tanto, existem ferramentas que fazem essa avaliação de

aderência, ou maturidade, na implementação do *Lean*, como é o caso da SAE J4000/J4001 (CALARGE *et al.*, 2012; TABARES *et al.*, 2017).

Em agosto de 1999, a SAE (*Society for Automotive Engineers*) aprovou a norma SAE J4000, denominada “Identificação e medição das melhores práticas na implementação da operação *Lean*”. Essa norma foi complementada em novembro de 1999, pela SAE J4001, sendo denominada, então, "Manual do usuário para a implementação da operação *Lean*", que fornece instruções para avaliar o nível de aderência das organizações em relação à SAE J4000 (SAE, 1999a, 1999b). O padrão SAE J4000, é o documento principal e relaciona os critérios, por meio dos quais o *Lean* pode ser alcançado, sempre com foco na eliminação ou minimização de desperdícios. A seção principal da norma é formada por 52 componentes, divididos em 6 elementos (ética e organização; pessoas e recursos humanos; sistema de informação; relacionamento cliente/fornecedor e organização; gestão de produto; fluxo de produto e processo), que avaliam o grau de implementação dos princípios relacionados ao *Lean*, em uma empresa (SAE, 1999a).

Outra ferramenta elaborada para medir o nível de aderência, ou maturidade do *Lean* é a LESAT – Versão 1 (*Lean Enterprise Self-Assessment Tool – Version 1*). Essa ferramenta foi desenvolvida em 2001 por uma equipe de membros da indústria, governo e acadêmicos, apoiados pela Iniciativa de Avanço *Lean* do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology - MIT*). A LESAT é uma ferramenta de avaliação de nível empresarial, projetada para orientar a liderança, ao longo do processo de transformação, em direção a uma empresa mais *Lean*. Ela é composta por um questionário, utilizado como uma autoavaliação, integrando as perspectivas e pontos de vista da liderança empresarial. A ferramenta tem um duplo propósito, cujo primeiro é medir o estado atual e o segundo é prever um estado futuro, permitindo que as empresas avaliem e priorizem as lacunas entre o estado atual e o estado desejado. Por esses motivos, a LESAT é considerada uma ferramenta abrangente, detalhada e orientada para a ação, apresentando as lacunas e o roteiro para atingir o nível desejado de maturidade *Lean* (PERKINS *et al.*, 2010; KOLLA *et al.*, 2019). Liu *et*

al. (2017), comentam que a LESAT não se concentra apenas na aplicação de técnicas *Lean*, mas nos princípios gerais da empresa, transmitindo alta eficiência de valor para o cliente. Como estrutura, a LESAT é composta por três grupos básicos, 18 processos empresariais e 54 práticas *Lean* (MIT, 2001). A Figura 9 apresenta os grupos básicos e os processos empresariais, enquanto o Quadro 16 apresenta as 54 práticas. Para avaliar essas 54 práticas, os respondentes devem utilizar dois conjuntos de classificação, sendo um para o desempenho do estado atual e outro, para o desempenho do estado futuro. O estado desejado é baseado e projetado em um cronograma de transformação, representado um nível de desempenho realista e alcançável, ao longo do período de transformação. Tanto o estado atual quanto o desejado são pontuados, em uma escala de cinco níveis (Figura 10), variando do nível um (baixa aderência ao *Lean*) ao nível cinco (organização de classe mundial com relação à aderência ao *Lean*). Além disso, as lacunas são calculadas para cada prática, com base na distância entre o desempenho atual e o desempenho desejado. Por fim, os entrevistados são incentivados a fornecer comentários, por escrito, sobre as evidências, ou oportunidades de melhoria para cada prática (MIT, 2001).

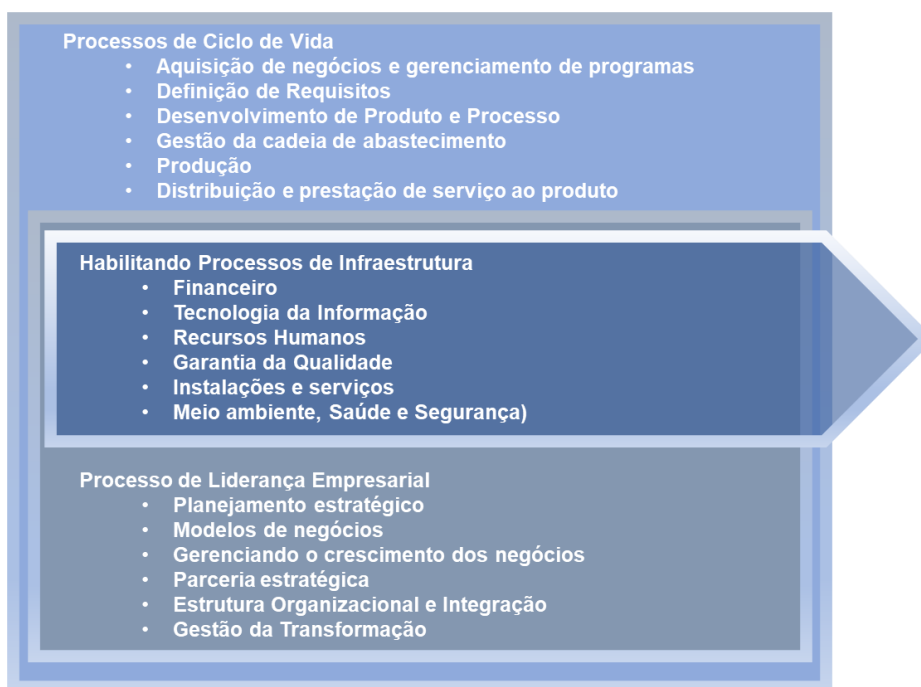


Figura 9 – Grupos básicos e processos empresariais da LESAT
(traduzido de MIT, 2001)

Quadro 16 – Práticas avaliadas pela LESAT

Grupo Básico - Transformação Lean/Liderança		
Processos Empresariais	Quantidade de Práticas	Práticas Lean
I.A Planejamento estratégico empresarial	1	I.A.1. Integração do <i>Lean</i> no processo de planejamento estratégico.
	2	I.A.2. Foco no valor do cliente
	3	I.A.3. Alavancando toda a empresa
I.B Adote o Paradigma <i>Lean</i>	4	I.B.1. Aprendizagem e educação em <i>Lean</i> para líderes empresariais
	5	I.B.2. Compromisso da alta administração
	6	I.B.3 Visão da Empresa <i>Lean</i>
	7	I.B.4. Senso de urgência
I.C Foco no Fluxo de Valor	8	I.C.1. Compreender o fluxo de valor atual
	9	I.C.2. Fluxo empresarial
	10	I.C.3. Projetando o fluxo de valor futuro
	11	I.C.4. Medidas de desempenho
I.D Desenvolver estrutura e comportamento <i>Lean</i>	12	I.D.1. Orientação organizacional empresarial
	13	I.D.2. Relações baseadas na confiança mútua
	14	I.D.3. Comunicações abertas e oportunas
	15	I.D.4. Empoderamento do funcionário
	16	I.D.5. Alinhamento de incentivos
	17	I.D.6. Incentivo à inovação
	18	I.D.7. Agentes de mudança <i>Lean</i>
I.E Criar e Refinar o Plano de Implantação	19	I.E.1. Plano de implantação <i>Lean</i> de nível empresarial
	20	I.E.2. Dedique recursos para melhorias do <i>Lean</i>
	21	I.E.3. Fornece educação e treinamento
I.F Implementar Iniciativas Lean	22	I.F.1. Desenvolvimento de planos detalhados com base no plano empresarial
	23	I.F.2. Acompanhamento da implantação detalhada
I.G Foco na Melhoria Contínua	24	I.G.1. Processo estruturado de melhoria contínua
	25	I.G.2. Monitorando o progresso do <i>Lean</i>
	26	I.G.3. Nutrindo o processo
	27	I.G.4. Capturando lições aprendidas
	28	I.G.5. Impacto no planejamento estratégico da empresa
Grupo Básico - Processos de Ciclo de Vida		
Processos Empresariais	Quantidade de Práticas	Práticas Lean
II.A. Aquisição de negócios e gerenciamento de programas	1	II.A.1. Alavancar a capacidade do <i>Lean</i> para o crescimento do negócio
	2	II.A.2. Otimizar a capacidade e a utilização de ativos
	3	II.A.3. Fornecer capacidade para gerenciar riscos, custos, cronograma e desempenho
	4	II.A.4. Alocar recursos para esforços de desenvolvimento de programas
II. B. Definição de Requisitos	5	II.B.1. Estabelecer um processo de definição de requisitos para otimizar o valor do ciclo de vida
	6	II.B.2. Utilizar dados de toda a empresa para otimizar futuras definições de requisitos
II.C. Desenvolver produto e processo	7	II.C.1. Incorporar o valor do cliente ao <i>design</i> de produtos e processos
	8	II.C.2. Incorporar os valores das partes interessadas em produtos e processos
	9	II.C.3. Integrar o desenvolvimento de produtos e processos
II.D. Gestão da cadeia de suprimentos	10	II.D.1. Definir e desenvolver rede de fornecedores
	11	II.D.2. Otimizar o desempenho de toda a rede
	12	II.D.3. Promover a inovação e o compartilhamento do conhecimento em toda a rede de fornecedores
II.E. Produzir o Produto	13	II.E.1. Utilizar o conhecimento e as capacidades de produção para obter vantagem competitiva
	14	II.E.2. Estabelecer e manter um sistema de produção <i>Lean</i>
II.F. Distribuir e prestar serviço ao produto	15	II.F.1. Alinhar as vendas e <i>marketing</i> à produção
	16	II.F.2. Distribuir produtos de maneira <i>Lean</i>
	17	II.F.3. Aumentar o valor dos produtos e serviços entregues aos clientes e à empresa
	18	II.F.4. Fornecer serviço pós-entrega, suporte e sustentabilidade
Grupo Básico - Habilitando a Infraestrutura		
Processos Empresariais	Quantidade de Práticas	Práticas Lean
III.A. Habilitadores Organizacionais do <i>Lean</i>	1	III.A.1. O sistema financeiro apóia a transformação <i>Lean</i>
	2	III.A.2. As partes interessadas da empresa obtêm as informações financeiras necessárias
	3	III.A.3. Fomentar a organização de aprendizagem
	4	III.A.4. Capacitar a empresa <i>Lean</i> com sistemas e ferramentas de informação
	5	III.A.5. Integração da proteção ambiental, saúde e segurança no negócio
III.B. Habilitadores de processo <i>Lean</i>	6	III.B.1. Padronização de processos
	7	III.B.2. Ferramentas e sistemas comuns
	8	III.B.3. Redução da variação

(traduzido de MIT, 2001)

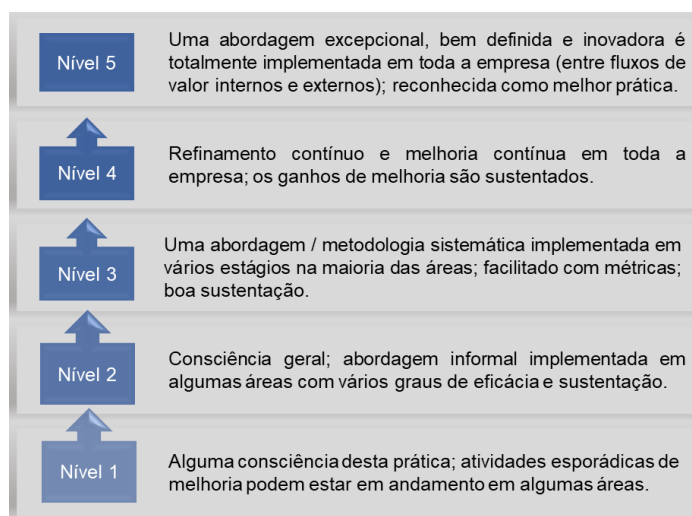


Figura 10 – Definições do nível de capacidade genérica da LESAT
(traduzido de MIT, 2001)

Assim, o roteiro completo de transição para o *Lean* no nível empresarial (Figura 11) ilustra um “fluxo” geral de ações, decisões e iniciativas que uma organização pode seguir em busca de sua própria transformação *Lean*. A partir desse roteiro, os autores comentam que cada empresa tem seu próprio ponto de partida e circunstâncias particulares que ditarão como ela abordará sua transição para o *Lean*. Dessa forma, o tempo e esforço necessários para completar o ciclo pode variar consideravelmente de empresa para empresa (MIT, 2000).

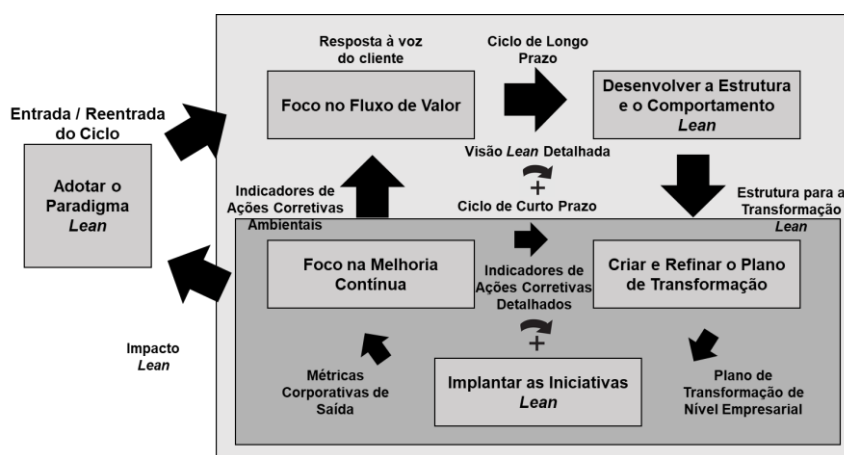


Figura 11 – Roteiro de transição para o *Lean*
(traduzido de MIT, 2001)

Dessa forma, como benefício estratégico da LESAT, Nightingale (2001) comentam que a avaliação de toda a empresa para a transição para o *Lean* pode fornecer um ponto de vista holístico, identificando interações complexas. Segundo o autor, essa avaliação é fundamental para projetar e executar uma transformação empresarial, pois ela mede várias dimensões de desempenho para entender o estado atual da filosofia *Lean* e para traçar o plano de transformação que levará a um estado futuro diferente, auxiliando as empresas a enfrentar os desafios existentes nessa caminhada. Avaliações desse formato ajudam a identificar lacunas de desempenho, priorizar pontos de foco e representam um papel importante na geração de uma visão de estado futuro para a empresa. Conforme o plano de transformação é implementado, a avaliação contínua pode oferecer *feedback* e medir o progresso. Esse *feedback* pode ser usado para revisar o plano de transformação, ao longo do tempo.

De acordo ainda com Nightingale (2001), as avaliações podem ser usadas também para o gerenciamento de negócios e operações, atuando como um indicador importante para a mudança de desempenho e identificando os pontos fortes e/ou fracos do programa. Além dessas funções internas, essa avaliação é igualmente importante fora da empresa, pois quando uma avaliação empresarial é compartilhada com os fornecedores, ela pode ser usada para motivar todas as empresas e participantes da cadeia de suprimentos a conduzir um processo de produção tranquilo, aumentando sua eficiência. A aplicação contínua dessa avaliação proporciona uma série de benefícios tangíveis e diretos para a empresa, fornecendo informações importantes sobre o desempenho e as tendências da organização. Esses benefícios incluem:

- Identificar os pontos fortes e fracos da empresa.
- Identificar lacunas de desempenho e oportunidades de melhoria.
- Gerar uma visão de estado futuro para a empresa.
- Proporcionar transformação orientadora.
- Conduzir o comportamento empresarial.
- Permitir uma melhor tomada de decisão.
- *Benchmarking* interno.

- Educar os participantes.
- Acompanhar o progresso na jornada de transformação.
- Aumentar a coesão do pessoal e a comunicação da equipe.
- Conhecer os princípios e práticas.
- *Feedback* da avaliação para a equipe.

Por fim, os autores comentam que esses benefícios são os diferenciais da LESAT para outras ferramentas de medição da maturidade do *Lean* (como SAE J4000), pois essas outras ferramentas não avaliam a empresas como um todo, não fazem uma análise das lacunas e não identificam os próximos passos para a transformação *Lean* (NIGHTINGALE, 2001).

Existem também outros trabalhos que se propuseram a desenvolver ferramentas para medir o nível de maturidade do *Lean*, porém, nenhum deles desenvolveu ferramentas que avaliam o *Lean* de maneira abrangente. Belhadi *et al.* (2018), por exemplo, desenvolveu uma ferramenta para medir a maturidade do *Lean* em pequenas e médias empresas. Segundo os autores, essas empresas apresentam dificuldades em utilizar ferramentas mais complexas e abrangentes para a avaliação do *Lean*. Já Chiera *et al.* (2021), apresentaram uma ferramenta para medir a maturidade das práticas *Lean*, na abordagem de “*Engineer To Order* (ETO)”. Para os autores, essa ferramenta é de fácil implementação e pode ser utilizada no mapeamento dos processos das empresas, identificando fraquezas e oportunidades de melhoria, no contexto da ETO. Mohamed (2021), por sua vez, desenvolveu uma ferramenta para medir a maturidade das práticas *Lean* em projetos de construção. De acordo com o autor, o objetivo dessa ferramenta é auxiliar as empresas de construção a identificar oportunidades em seus planejamentos estratégicos, em termos de gestão de resíduos e riscos em geral, especificamente nos países em desenvolvimento.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo serão descritas a classificação da pesquisa e a abordagem metodológica, utilizadas no desenvolvimento desta tese. Também serão apresentados os procedimentos utilizados para a construção do método proposto.

3.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Em função do problema desta tese ser de aplicação industrial, esta pesquisa está inserida nos estudos da Engenharia de Produção, na área de concentração de Gestão e Estratégia, dentro da linha de pesquisa Gestão Estratégica de Operações.

Com isso, a Figura 12 ilustra a classificação da pesquisa, assim como os procedimentos adotados.



Figura 12 – Classificação da Pesquisa e Procedimentos Adotados

Dessa forma, a classificação desta pesquisa se dá, quanto a sua natureza, como uma pesquisa aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática na solução de problemas específicos (PRODANOV e FREITAS, 2013). Quanto ao seu objetivo, a pesquisa é classificada como exploratória, pois proporciona maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses (GIL, 2002). Com relação à abordagem, a pesquisa é classificada como quantitativa, pois captura as evidências do trabalho por meio da mensuração das variáveis envolvidas, sem nenhum subjetivismo, ou influência nos fatos a serem analisados (BRYMAN, 1989; MIGUEL, 2007). Com relação aos procedimentos utilizados na condução

da pesquisa, foi utilizada a Revisão Sistemática da Literatura (teórico-conceitual) (LEVY e ELLIS, 2006) e a *Design Science Research* (HEVNER, 2007) para construção do método proposto.

3.2. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Definiram-se as seguintes etapas para o desenvolvimento da pesquisa, conforme apresenta a Figura 13.



Figura 13 – Etapas da Abordagem Metodológica

Na Etapa 1 desenvolve-se a revisão narrativa da literatura sobre a importância da filosofia *Lean* no processo de implementação da Indústria 4.0 e sobre as interações e relações entre o *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0. Além disso, é analisada a existência de um método ou modelo que atenda ao mesmo objetivo desta tese. Na Etapa 2, explorada no Capítulo 3, definem-se os procedimentos de pesquisa que apoiam a construção do método proposto. Na Etapa 3 são desenvolvidas as revisões sistemáticas da literatura, com o objetivo de confirmar a lacuna de pesquisa e identificar de forma específica as interações entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0. A Etapa 4 consiste na construção do método proposto, com base nas etapas do procedimento de pesquisa *Design Science Research*, discutidas no Capítulo 4. Por fim, na Etapa 5 são realizadas as aplicações de ilustração do método proposto.

3.2.1. PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

Para este trabalho, foram utilizados como procedimento de pesquisa a Revisão Sistemática da Literatura, para a definição da lacuna na literatura e para o levantamento das interações entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0. Utiliza-se também o *Design Science Research*, para o desenvolvimento do método que responde ao objetivo geral desta tese, pois é um procedimento adequado para se projetar métodos.

Observa-se ainda que, apesar da literatura utilizar diferentes termos como princípios, práticas, métodos e ferramentas para demonstrar a aplicação do *Lean*, nesta tese será utilizado o termo “práticas”, pois está alinhado com a ferramenta selecionada para avaliação da maturidade do *Lean*.

3.2.1.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura proporciona ao pesquisador a possibilidade de refinar hipóteses, compilar os dados, estimar o tamanho da amostra, identificar o melhor método de pesquisa adotado em relação ao problema em questão e direcionar pesquisas futuras (Cooper, 1998). Segundo Levy e Ellis (2006), o método de revisão sistemática é denominado como um processo de coletar, conhecer, compreender, analisar, sintetizar e avaliar um conjunto de artigos científicos, com o objetivo de estabelecer um embasamento teórico-científico sobre o assunto pesquisado. Os autores citam que uma revisão sistemática da literatura efetiva acontece em três etapas, apresentadas na Figura 14.

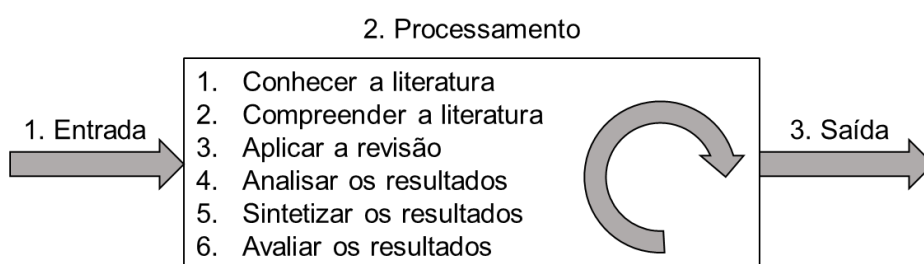


Figura 14 – Etapas da Revisão Sistemática da Literatura
(traduzido de Levy e Ellis, 2006)

Na etapa de entrada são determinados os termos de busca, selecionadas as fontes primárias de pesquisa, estabelecidos os critérios de inclusão e exclusão e, por fim, é realizada a compilação dos dados.

Já, na etapa de processamento, reforça-se a necessidade de executar ciclicamente as seis fases determinadas (conhecer a literatura, compreender a literatura, aplicar a revisão, analisar os resultados, sintetizar os resultados e avaliar os resultados), aumentando o conhecimento sobre o assunto e repetindo-as quantas vezes forem necessárias, até que os objetivos sejam alcançados. Por fim, na etapa de saída, são apresentados os resultados, a partir da pesquisa realizada.

Como parte do desenvolvimento desta tese, foram realizadas quatro revisões sistemáticas da literatura, com os seguintes objetivos:

- Analisar, de forma geral, quais são as oportunidades, riscos ou desafios encontrados na literatura para a implementação da Indústria 4.0.
- Identificar se existe na literatura algum trabalho que aborda o objetivo desta tese.
- Identificar documentos que apontam o *Lean* como uma filosofia de apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0, e como os autores abordam as relações específicas entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.
- identificar quais outros autores também analisam a interação ou relação (de maneira específica) entre o *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.

3.2.1.2 DESIGN SCIENCE RESEARCH

A *Design Science Research* pode ser apresentada em duas vertentes (BAGNI *et al.*, 2021). Uma delas visa resolver um problema em um determinado contexto, apresentando como objetivo o desenvolvimento de um artefato que produza os resultados desejados nesse determinado contexto. O artefato pode ser um objeto (por exemplo, um robô), um software ou aplicativo, um modelo de referência (por exemplo, um framework para escrever um artigo), um processo,

entre outros (SIMON, 1996; HOLMSTRÖM *et al.*, 2009; VAN AKEN *et al.*, 2016; KUNZ e WASSENHOVE, 2019). Já a outra vertente visa desenvolver conhecimentos gerais que podem ser transferidos para outros contextos e desenvolver uma nova teoria (HOLMSTRÖM *et al.*, 2009; VAN AKEN *et al.*, 2016; KUNZ e WASSENHOVE, 2019).

Nesta tese será utilizada a vertente que compreende o desenvolvimento de um artefato, pois demonstra ser a mais adequada para o desenvolvimento de um método que permita definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Assim, observa-se que a ciência natural apresenta, como objetivo, descrever os fenômenos naturais e sociais, abordando um conjunto de conhecimentos sobre classes de objetos presentes no mundo e suas características, interações e comportamentos. Em complemento à ciência natural, Simon (1996) propõe a “ciência do artificial”, que aborda o estudo de como os objetos devem ser, para realizar determinadas funções e alcançar seu propósito. O “artificial” é entendido como um artefato que foi criado e produzido pelo homem (como, por exemplo, máquinas, organizações, economia, entre outros), que tenha as propriedades desejadas e alcance os objetivos definidos (SIMON, 1996 e MATANA *et al.*, 2020).

Artefatos são sistemas, ou objetos que apresentam como objetivo a execução de uma determinada ação, para se obter um determinado resultado, em uma determinada situação (VAN AKEN, 2004). Os artefatos podem ser classificados em constructos, modelos, métodos e instanciações, conforme apresentado no Quadro 17 (MARCH e SMITH, 1995; MANSON, 2006).

Quadro 17 – Tipos de Artefatos

Tipos de Artefatos	Constructos	Constructos ou conceitos formam o vocabulário de um domínio. Eles constituem uma conceituação utilizada para descrever os problemas dentro do domínio e para especificar as respectivas soluções.
	Modelos	Um modelo é um conjunto de proposições ou declarações que expressam as relações entre os constructos. Em atividades de <i>design</i> , modelos representam situações como problema e solução. Ele pode ser visto como uma descrição, ou seja, como uma representação de como as coisas são.
	Métodos	Um método é um conjunto de passos (um algoritmo ou orientação) usado para executar uma tarefa. Métodos baseiam-se em um conjunto de constructos subjacentes e um modelo em um espaço de solução.
	Instanciações	Uma instanciação é a concretização de um artefato em seu ambiente. Instanciações operacionalizam constructos, modelos e métodos. No entanto, uma instanciação pode, na prática, preceder a articulação completa de seus constructos, modelos e métodos.

(traduzido de March e Smith, 1995 e Manson, 2006)

A partir dessa análise, observa-se que a missão da *Design Science* é desenvolver o conhecimento para permitir a concepção e o projeto de artefatos (VAN AKEN, 2004), projetando e produzindo sistemas e objetos que ainda não existam e/ou modificando situações existentes para alcançar melhores resultados (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JR, 2015).

Lacerda *et al.* (2013) comentam que a responsabilidade da *Design Science* é conceber, projetar e validar artefatos inexistentes. Já o *Design Science Research* é o procedimento de pesquisa que operacionaliza seus conceitos, assegurando a devida validade e o rigor científico (CHAKRABARTI, 2010).

O *Design Science Research* constitui-se de um procedimento rigoroso, que visa criar e projetar artefatos para executar determinados propósitos que resolvam problemas observados, avaliando o que foi projetado e comunicando os resultados obtidos (ÇAGDAS e STUBKJÆR, 2011). O procedimento *Design Science Research* é utilizado no desenvolvimento de artefatos, ou na geração de conhecimento, considerados úteis para a solução de problemas (VENABLE, 2006).

A execução do *Design Science Research* se dá em três ciclos: relevância, rigor e projeto (Figura 15). O ciclo referente ao projeto do artefato é considerado

fundamental e central, porém sua interação com os ciclos de relevância e rigor são essenciais para uma pesquisa científica válida (HEVNER, 2007).

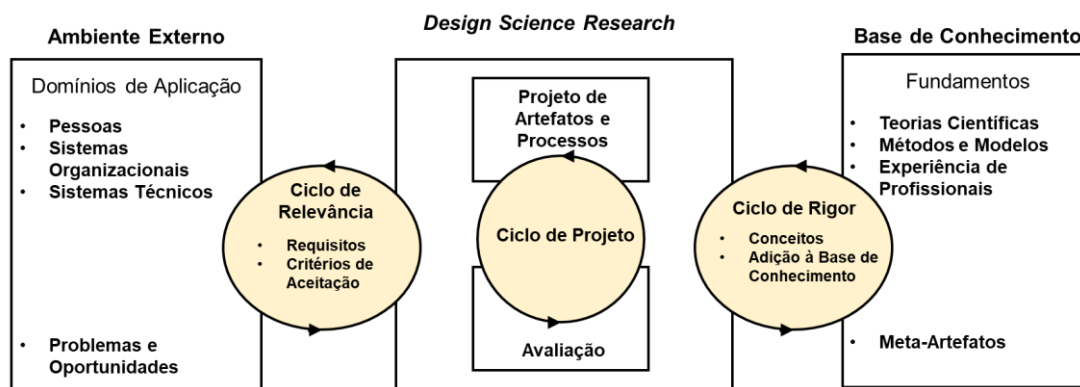


Figura 15 – Ciclos do *Design Science Research*

(traduzido de Hevner, 2007)

O *Design Science Research* se inicia com o ciclo de relevância. Nele, identifica-se, primeiramente, a existência de oportunidades e/ou problemas nos domínios de aplicação do ambiente externo: pessoas (funções, capacidades, características, etc.), sistemas organizacionais (estratégias, estruturas, cultura, processos, etc.) e/ou sistemas técnicos (infraestrutura, aplicações, literatura, etc.). Assim, a partir de um problema de pesquisa definido e delimitado, é possível estabelecer os requisitos da pesquisa e os critérios de aceitação do artefato, que servirão de entrada para o ciclo do projeto (HEVNER, 2007).

Em seguida, tem-se o ciclo de rigor, que deve ser iniciado a partir da análise de uma base de conhecimento que fundamenta toda a pesquisa, incluindo teorias científicas, modelos de engenharia, experiência de profissionais no domínio de aplicação e os artefatos existentes (HEVNER, 2007). O objetivo do ciclo de rigor é identificar as teorias apropriadas para as ideias de projeto do artefato a ser desenvolvido, analisando a aderência aos requisitos da pesquisa (definidos no ciclo de relevância), os artefatos existentes, os projetos análogos em outros domínios de aplicação, além dos conceitos e teorias acadêmicas (IVARI, 2007).

O terceiro e último ciclo a ser realizado é o de projeto, de modo que as suas entradas de informação são as saídas dos ciclos de relevância e rigor, o que

torna o ciclo de projeto relativamente independente para sua execução (HEVNER, 2007). O objetivo do ciclo de projeto é a geração de pelo menos uma alternativa de projeto do artefato e seu respectivo êxito na avaliação quanto ao atendimento aos requisitos da pesquisa (SIMON, 1996).

Apesar dos ciclos de execução do *Design Science Research* conduzirem a pesquisa de forma válida e cientificamente rigorosa, recomenda-se a utilização de uma técnica sequencial que oriente detalhadamente o projeto do artefato, no ciclo de projeto, fazendo com que a pesquisa seja mais disciplinada, rigorosa e transparente (IVARI, 2007).

Dessa forma, a pesquisa de Manson (2006) expõe que a condução do *Design Science Research*, para o projeto do artefato, é formada por cinco etapas: conscientização, sugestão, desenvolvimento, avaliação e finalização, conforme apresentado na Figura 16.

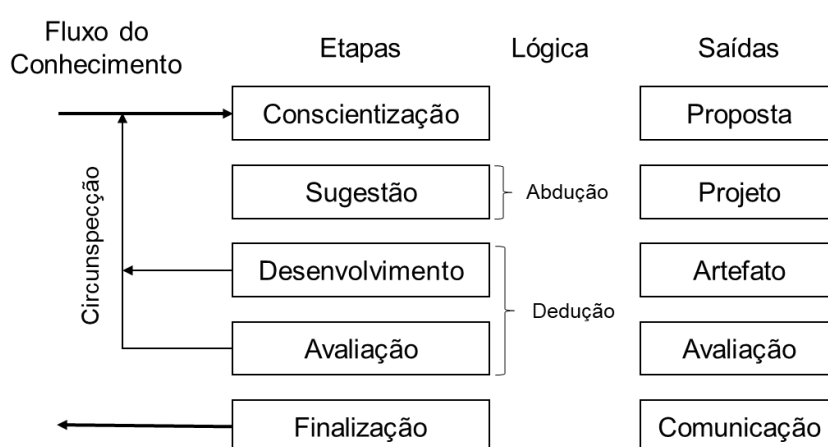


Figura 16 – Etapas do *Design Science Research*
(traduzido de Manson, 2006)

A etapa de conscientização aborda a compreensão do problema de pesquisa, em uma ampla perspectiva, o que resulta na definição e formalização do problema, requisitos de pesquisa e o escopo de estudo (MANSON, 2006).

Na etapa de sugestão tem-se o processo criativo de abdução, na tentativa de formular pelo menos um projeto de artefato, considerando que os distintos

pesquisadores podem gerar diferentes possíveis soluções (MANSON, 2006). As sugestões de artefatos satisfatórias são aceitáveis, quando uma solução ótima não for possível de se obter (SIMON, 1996). Dessa forma, uma solução pode ser considerada satisfatória, quando houver um consenso entre os envolvidos no problema e o artefato atender aos critérios de aceitação previamente definidos (HEVNER, 2007).

Na etapa de desenvolvimento ocorre a dedução, com base nas teorias existentes. Nessa etapa, desenvolve-se o artefato, formando o seu estado funcional, podendo, por exemplo, ser composto ou baseado em: algoritmos, *softwares*, sistemas, métodos, modelos, protótipos, entre outros (MANSON, 2006; LACERDA *et al.*, 2013).

Na etapa de avaliação, analisa-se o comportamento do artefato no ambiente para o qual foi projetado, verificando se a solução do problema de pesquisa foi atendida. (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JR, 2015). Raramente um artefato atende completamente as expectativas de solução ao problema de pesquisa. Quando isso ocorre, deve-se apresentar o desvio de desempenho do artefato, com relação aos critérios de aceitação. Caso o artefato não atenda aos critérios de aceitação deve-se então considerar a necessidade de retornar à etapa de conscientização para ajustes na compreensão do problema de pesquisa. Esse caminho é chamado de circunspeção (MANSON, 2006).

No estudo apresentado por Hevner *et al.* (2004), a etapa de avaliação pode ser realizada, de forma observacional, analítica, experimental, por testes, ou descritiva, conforme mostra o Quadro 18.

Quadro 18 – Formas de Realização da Etapa de Avaliação

Forma de Avaliação	Métodos e Técnicas Propostas
Observacional	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos do Estudo de Caso: estuda o artefato, existente ou criado, em profundidade no ambiente de negócios. • Estudo de Campo: Monitora o uso do artefato em projetos múltiplos.
Analítico	<ul style="list-style-type: none"> • Análise Estática: examina a estrutura do artefato para qualidades estáticas (por exemplo, complexidade). • Análise da Arquitetura: estuda o encaixe do artefato na arquitetura técnica, do sistema técnico geral. • Otimização: demonstra as propriedades ótimas inerentes ao artefato ou então demonstra os limites de otimização no comportamento do artefato. <p>Análise Dinâmica: estuda o artefato durante o uso para avaliar suas qualidades dinâmicas (por exemplo, desempenho).</p>
Experimental	<ul style="list-style-type: none"> • Experimento Controlado: estuda o artefato em um ambiente controlado para verificar suas qualidades (por exemplo, usabilidade). • Simulação: executa o artefato com dados artificiais.
Teste	<ul style="list-style-type: none"> • Teste Funcional (<i>Black Box</i>): executa as interfaces do artefato para descobrir possíveis falhas e identificar defeitos. • Teste Estrutural (<i>White Box</i>): realiza testes de cobertura de algumas métricas para a implantação do artefato (por exemplo, caminhos para a execução).
Descritivo	<ul style="list-style-type: none"> • Argumento Informado: utiliza a informação das bases de conhecimento (por exemplo, das pesquisas relevantes) para construir um argumento convincente a respeito da utilidade do artefato. • Cenários: constrói cenários detalhados em torno do artefato, para demonstrar sua utilidade.

(adaptado de Hevner *et al.*, 2004)

Por fim, a etapa de finalização tem como objetivo consolidar o conhecimento adquirido, o processo de criação e o projeto do artefato, seus mecanismos de avaliação e a obtenção de resultados (MANSON, 2006).

3.2.2. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Esta seção tem como objetivo apresentar os passos do desenvolvimento desta pesquisa, com o apoio do procedimento *Design Science Research*. Para tanto, foi adotada a técnica de *Design Science Research* proposta por Hevner (2007), com os três ciclos (Figura 20), com o suporte da técnica apresentada por Manson (2006), com suas cinco etapas de projeto cujos passos são apresentados na Figura 21.

A pesquisa inicia-se com a etapa de revisão narrativa da literatura, a qual aborda os principais conceitos teóricos sobre Indústria 4.0, filosofia *Lean*, métodos de avaliação da maturidade do *Lean* e a identificação da lacuna de pesquisa.

Em seguida, tem-se os procedimentos de pesquisa, iniciando com a revisão sistemática da literatura, a qual aborda:

- Confirmação da lacuna de pesquisa, em que não foram encontrados trabalhos que abordem o objetivo desta tese.
- O *Lean* como filosofia de apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0.
- A interação ou relação (de maneira específica) entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.

A próxima etapa estabelece a contribuição deste trabalho. Para isso, define-se o segundo procedimento de pesquisa, o *Design Science Research*, que apoia a construção do método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*. O DSR é considerado um procedimento adequado para se criar métodos e é desenvolvido em três ciclos: relevância, rigor e projeto.

O ciclo de relevância busca apresentar as necessidades do método proposto e, para isso, baseia-se na revisão da literatura e na lacuna para definir o problema e o escopo de pesquisa, assim como os requisitos e critérios de aceitação do método.

O ciclo de rigor baseia-se nas definições do ciclo de relevância e na revisão da literatura, para identificar os conceitos e teorias que devem fundamentar o método proposto. Para tanto, identificam-se quais são as publicações que fazem uma análise específica da relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas *Lean*. Nessa etapa, seleciona-se, ainda, o método mais adequado para a análise do grau de maturidade do *Lean*.

O ciclo de projeto é baseado nas definições anteriores dos ciclos de relevância e rigor e é executado em cinco etapas: conscientização, sugestão, desenvolvimento, avaliação e finalização. Sua execução permite construir o método proposto nesta tese.

Na etapa de conscientização, procura-se um amplo entendimento do método proposto. Para tanto, revisitam-se as necessidades apresentadas no ciclo de

relevância e definem-se as variáveis e a relação entre elas, para atender a essas necessidades.

Na etapa de sugestão, pretende-se formular o método proposto. Para isso, são definidas a amplitude e as escalas de medição de cada variável. Ainda nessa etapa, deve-se selecionar a ferramenta de processamento das informações que permita relacionar as variáveis de saída com as de entrada.

Na etapa de desenvolvimento, define-se o modelo matemático do método, que permite à ferramenta de processamento das informações calcular as variáveis de saída.

Na etapa de avaliação, o modelo matemático deve ser codificado para o modelo computacional e experimentado, até que satisfaça aos critérios de aceitação definidos no ciclo de relevância.

Na etapa de finalização, apresenta-se o método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Por fim, são realizadas as aplicações de Ilustração, seguindo três passos: planejamento, execução e discussão. No planejamento se identifica as empresas de manufatura que serão avaliadas pelo método proposto. Na execução, o método é aplicado nos processos das empresas. No passo de discussão, busca-se analisar a aplicação do método nas empresas selecionadas.

Assim, a Figura 17 apresenta todas as etapas para o desenvolvimento da pesquisa.

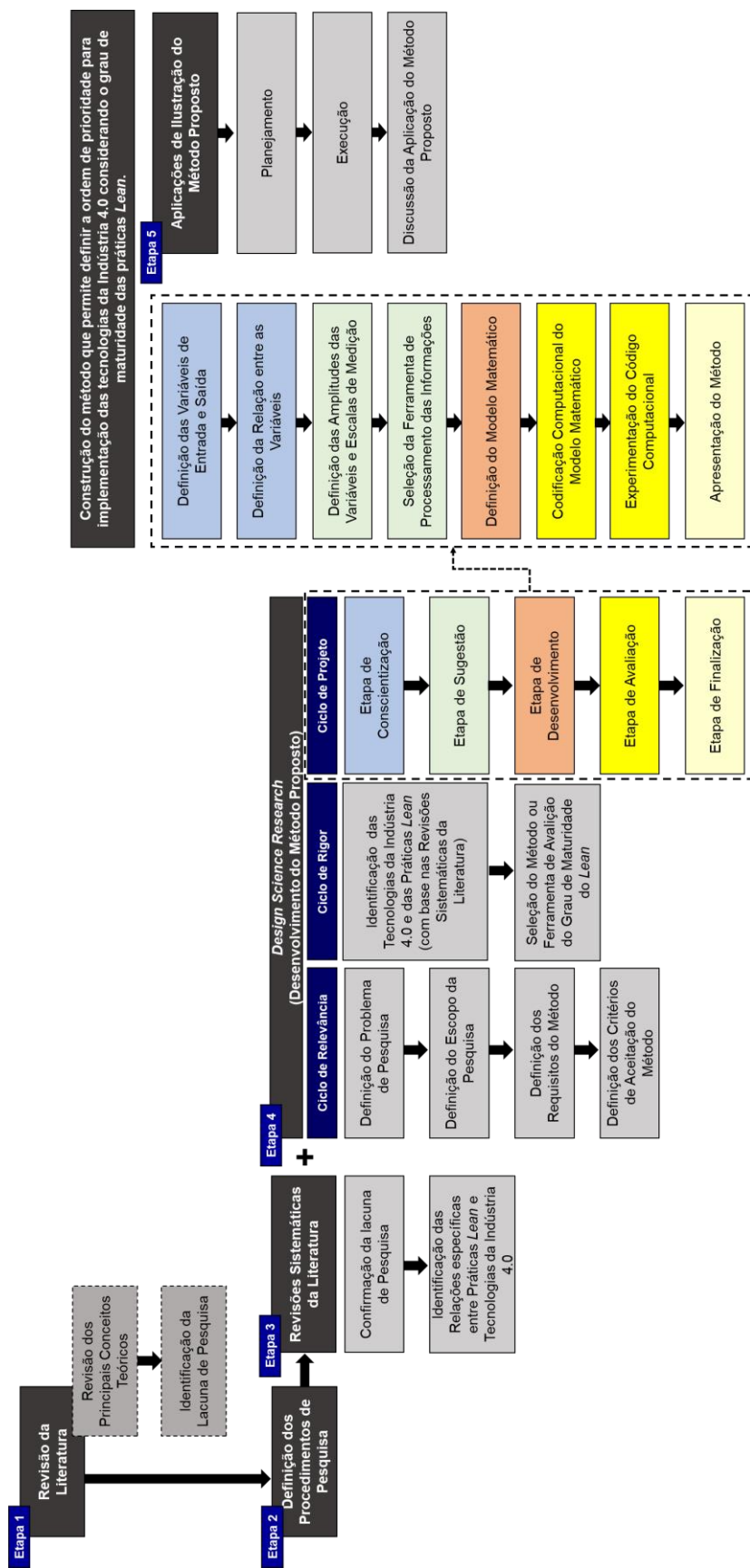


Figura 17 – Etapas do Desenvolvimento da Pesquisa

3.2.2.1. MÉTODOS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 CONSIDERANDO O GRAU DE MATURIDADE *LEAN*

Nesta seção é realizada uma revisão sistemática da literatura, utilizada para identificação de métodos de implementação das tecnologias da Indústria 4.0, com base no grau de maturidade das práticas *Lean*. A revisão foi realizada em 02 de Fevereiro de 2022, utilizando a seguinte *string* de busca:

("industr 4.0" OR "industr* 4.0 technolog*") AND (implementation OR implantation OR introduction OR prioritiz*) AND (lean* OR "lean maturity") AND (model OR tool OR method OR artifact)*

As bases de busca utilizadas foram a Scopus, Web Of Science, Science Direct, IEEE, Emerald e Springer Link. A pesquisa foi realizada considerando o título, palavras-chave e resumo dos documentos e não foi especificado um período, pois o objetivo era analisar a existência de um método, desde o início da utilização do termo Indústria 4.0. Foi identificado um total de 519 documentos (artigos acadêmicos, trabalhos apresentados em conferências e capítulos de livros) e, após a exclusão de documentos repetidos entre as bases, chegou-se a 181 documentos. Para o início da análise, foi verificado se eles estavam disponíveis para leitura e se estavam nos idiomas português, inglês ou espanhol. Após essa verificação, restaram 158 documentos para a leitura do título, resumo, palavras-chave e método de pesquisa. Com base nessa leitura, não foram encontrados documentos que propusessem o desenvolvimento de um método que permita definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean* (Figura 18).

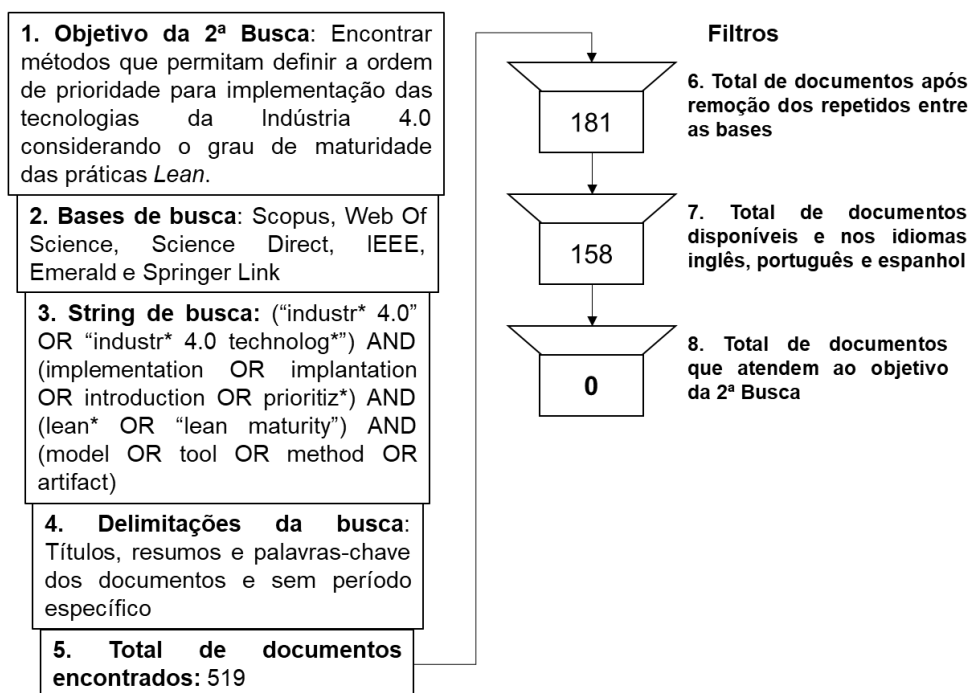


Figura 18 – Etapas da Revisão Sistemática da Literatura Referente à Identificação de Métodos que Definem uma Ordem de Prioridade para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.0

4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PROPOSTO

Este capítulo descreve a execução e os resultados dos passos do desenvolvimento da pesquisa (Figura 22) para a construção do método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

4.1. CICLO DE RELEVÂNCIA

O primeiro ciclo do *Design Science Research* é o de relevância. Em seus passos, apresentados a seguir, são definidos o problema e o escopo da pesquisa, bem como os requisitos e os critérios de aceitação do método de avaliação.

4.1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA E IDENTIFICAÇÃO DA LACUNA

Para definir o problema de pesquisa e identificar a lacuna do presente estudo, foram desenvolvidas duas Revisões Sistemáticas da Literatura (RSL).

Na primeira revisão, realizada em 02 de Fevereiro de 2022, analisou-se, de forma geral, riscos, desafios ou oportunidades, para a implementação da Indústria 4.0 (Figura 19). Para tanto, foi utilizada a seguinte *string* de busca:

“industr 4.0” AND (risk* OR challenge* OR difficult* OR threat* OR danger* OR opportunit* OR barrier* OR obstacle* OR roadblock* OR impediment* OR complication* OR disadvantage* OR problem* OR issue* OR worr* OR trouble* OR complexit* OR adversit*)*

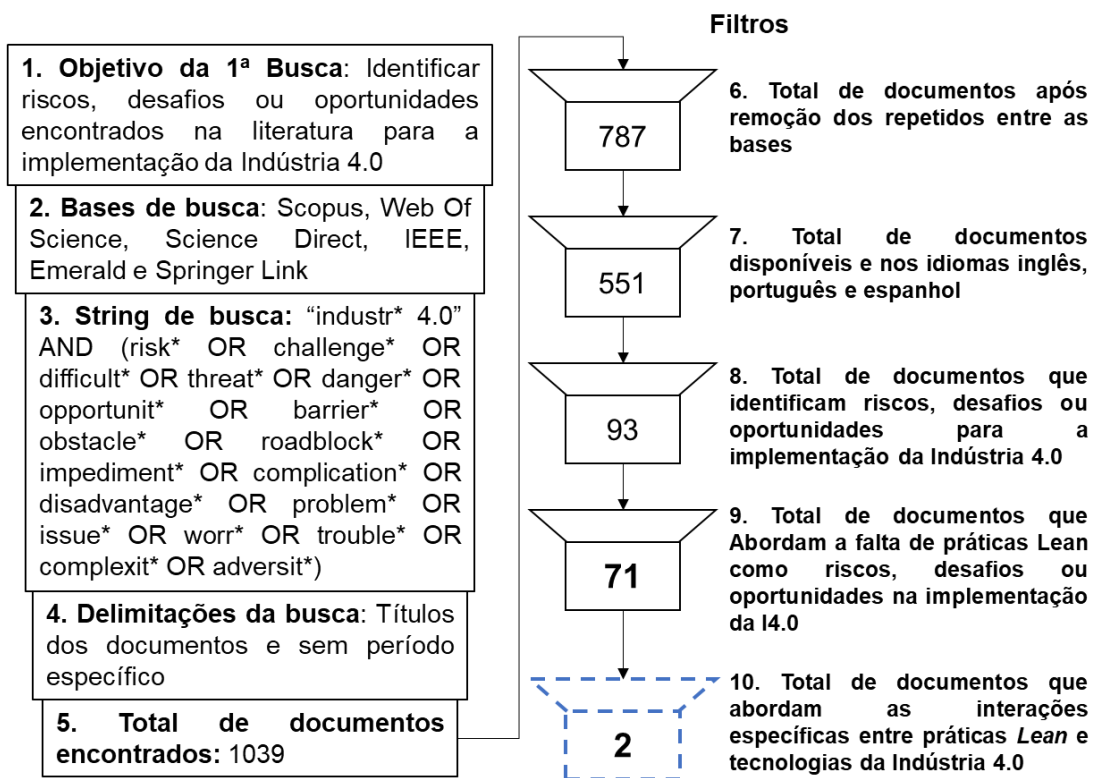


Figura 19 – Etapas da Revisão Sistemática da Literatura Referente aos Riscos, Desafios ou Oportunidades na Implementação da Indústria 4.0

As bases de busca utilizadas foram a Scopus, Web Of Science, Science Direct, IEEE, Emerald e Springer Link. A pesquisa foi realizada considerando o título dos documentos e não foi especificado um período, pois o objetivo era analisar esses riscos, desafios, ou oportunidades, desde o início da utilização do termo Indústria 4.0. Foi identificado um total de 1039 documentos (artigos acadêmicos, trabalhos apresentados em conferências e capítulos de livros) e, após a exclusão de documentos repetidos entre as bases, chegou-se a 787 documentos. Para o início da análise, foi verificado se eles estavam disponíveis para leitura e se estavam nos idiomas português, inglês ou espanhol. Após essa verificação, restaram 551 documentos para a leitura do título, resumo, palavras-chave e método de pesquisa. Com isso, foram analisados quais documentos abordavam os riscos, desafios, ou oportunidades para a implementação da Indústria 4.0. A partir dessa análise, identificou-se que 93 documentos fazem essa abordagem. Entre esses 93 documentos, 71 (76%) citam como pontos importantes a serem considerados, antes (ou ao longo) da implementação da Indústria 4.0, algumas

práticas, como, por exemplo, a padronização, a mudança cultural, o envolvimento da liderança, as integrações das cadeias, o preparo da mão de obra, entre outras. Essas mesmas práticas já são abordadas pela filosofia *Lean* e podem ser consideradas base para a implementação da Indústria 4.0. Por fim, entre esses 71, dois documentos dois já abordam as interações específicas entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.

A segunda revisão sistemática, apresentada na Seção 3.2.2.1, tem como objetivo identificar a lacuna de pesquisa, por meio da identificar trabalhos relacionados com a construção de um método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Conforme descrito na Seção 3.2.2.1, foram identificados 158 documentos que atendem ao objetivo de busca, conforme a *string* e protocolo definidos. Após a leitura do título, resumo, palavras-chave e métodos dos 158 documentos, não foram identificados documentos que propõem um método que permita definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Com a verificação dessa lacuna na literatura, define-se o problema de pesquisa para esta tese: É possível estabelecer uma ordem sequencial para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 visando obter o maior aproveitamento dos benefícios decorrentes da interação entre essas tecnologias e as práticas *Lean*?

4.1.2. DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA PESQUISA

Como apresentado também no capítulo de Introdução desta tese, o escopo da pesquisa estende-se à proposta de um método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Com essa finalidade, foram realizadas duas revisões sistemáticas da literatura, citadas na Seção 4.2.1, como base para a definição do escopo da pesquisa:

- Identificar documentos que apontam o *Lean* como uma filosofia de apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0, e como os autores abordam as relações específicas entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.
- identificar quais outros autores também analisam a interação ou relação (de maneira específica) entre o *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.

Na primeira revisão sistemática, foram identificados 20 documentos que abordam o *Lean* como uma filosofia de apoio na implementação da Indústria 4.0. A partir desses 20 documentos, foi realizada a abordagem recomendada por Webster e Watson (2002), denominada de busca reversa das referências (*backward references search*). Com isso, conforme abordado na Seção 4.2.1, foram identificados mais 7 documentos que tratam o *Lean* como uma filosofia de apoio na implementação da Indústria 4.0.

Com o apoio desses 27 documentos, foi realizada a segunda revisão sistemática da literatura (também citada na Seção 4.2.1), com o objetivo de identificar quais outros documentos que abordam de maneira específica a interação ou relação entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0. Após essa análise, foram identificados mais 8 documentos que ao requisito dessa revisão.

Como resultado, chegou-se a um total de 35 documentos que identificam quais práticas *Lean* apresentam uma relação com as tecnologias da Indústria 4.0. Dessa forma, esses documentos serão utilizados como base para a definição de uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*, assim como os possíveis benefícios a serem alcançados.

4.1.3. DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DO MÉTODO PROPOSTO

O primeiro requisito do método refere-se à atribuição de graus de maturidade das práticas *Lean*. Como segundo requisito, o método deve relacionar as práticas *Lean* com as tecnologias da Indústria 4.0. Como terceiro requisito, o método deve, por meio de uma ferramenta de processamento das informações, atribuir pontuações às tecnologias da Indústria 4.0, a partir dos graus de maturidade das práticas *Lean*, indicando quais tecnologias podem ser priorizadas. O quarto requisito refere-se à característica de adaptabilidade que o método deve apresentar, para que seja facilmente atualizado, quando necessário. Por fim, o quinto requisito é a aplicação em empresas de manufatura que apresentem um grau mínimo de *Lean*.

Com base nesses cinco pontos, são estabelecidos os requisitos do método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

4.1.4. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

De acordo com Dresch, Lacerda e Antunes Jr (2015), o critério de aceitação primário do *Design Science Research* é o atendimento do artefato aos requisitos da pesquisa. Assim, o principal critério de aceitação é a capacidade do método em satisfazer os requisitos anteriormente definidos.

Segundo Manson (2006) e Matana *et al.* (2020), um artefato raramente atende por completo as expectativas do problema de pesquisa e que um desvio dos critérios de aceitação é permitido, porém, com sua devida apresentação. Assim, por se tratar de uma pesquisa inédita, sem base acadêmica para comparação dos resultados, aceita-se o menor erro que a ferramenta de processamento das informações pode oferecer, entre a resposta do modelo matemático e as pontuações atribuídas às tecnologias da Indústria 4.0, que não impacte negativamente a proposta do método, que seja alcançável com os recursos disponíveis e em um tempo adequado.

Os requisitos do método e seu critério de aceitação são ilustrados na Figura 20.

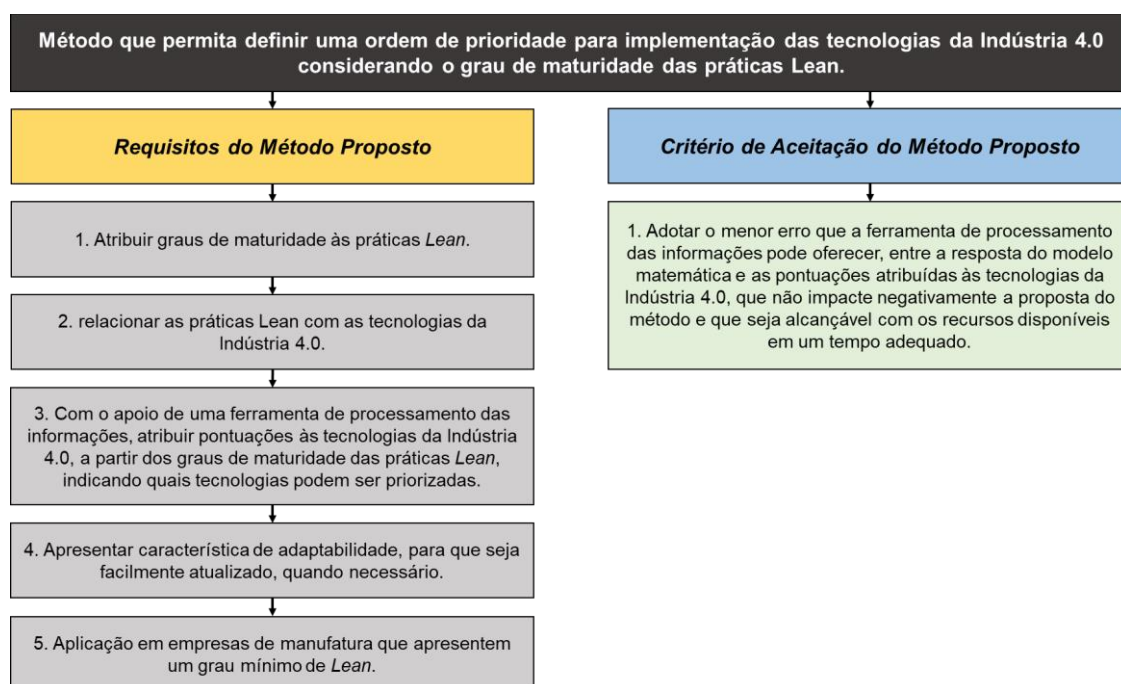


Figura 20 – Requisitos e critério de aceitação do método proposto

4.2. CICLO DE RIGOR

O segundo ciclo a ser executado do *Design Science Research* é o de rigor, no qual são apresentados os conceitos e teorias que apoiam os requisitos do método, apresentados no ciclo de relevância (conforme Figura 23).

4.2.1. IDENTIFICAÇÃO DAS PRÁTICAS *LEAN* E DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

Para a identificação das práticas *Lean* e das tecnologias da Indústria 4.0 que apresentam interações específicas entre si, foram realizadas duas revisões sistemáticas da literatura, além da análise dos dois documentos que apresentam essas interações, identificados na Seção 4.1.1.

Assim, a primeira revisão foi realizada em 03 de Fevereiro de 2022, como objetivo de identificar documentos que abordam o *Lean* como uma filosofia de apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0 (Figura 21). Para essa pesquisa, utilizou-se a seguinte *string* de busca:

“industr 4.0” AND technologies AND lean AND (bas* OR prerequisite* OR requisite* OR precondition* OR condition* OR requirement* OR imperativ* OR foundation OR baseline OR support OR guide OR enabl* OR relation OR correlation OR interaction OR influence OR action)*

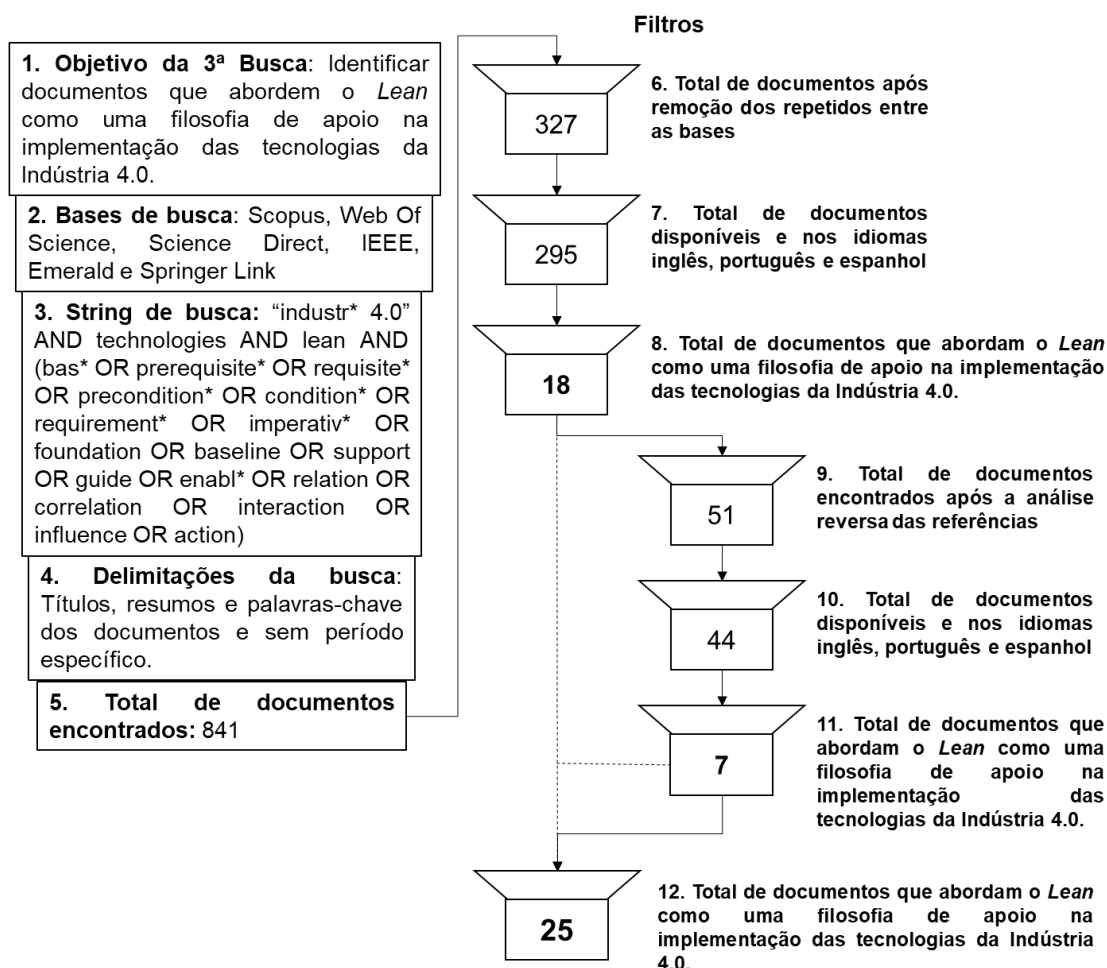


Figura 21 – Etapas da Revisão Sistemática da Literatura Referente ao *Lean* como filosofia apoio na implementação da Indústria 4.0

Foram utilizadas as mesmas bases de busca das duas análises anteriores. A pesquisa foi realizada, considerando o título, as palavras-chave, e o resumo dos documentos e não foi especificado um período, pois o objetivo era analisar o *Lean* como uma filosofia de apoio na implementação da Indústria 4.0, desde o início da utilização do termo Indústria 4.0. Assim, foi identificado um total de 841 documentos (artigos acadêmicos, trabalhos apresentados em conferências e capítulos de livros) e, após a exclusão dos repetidos entre as bases, chegou-se

a 327 documentos. Para o início da análise desses documentos, foi verificado se eles estavam disponíveis para leitura e se estavam nos idiomas português, inglês ou espanhol. Após essa verificação, restaram 295 documentos para a leitura do título, resumo, palavras-chave e método de pesquisa. Com isso, a busca concentrou-se em quais documentos abordavam o objetivo de seu protocolo. A partir dessa análise, identificou-se que 18 documentos fazem essa abordagem. Posteriormente à leitura desses 18 documentos, foi utilizada a prática recomendada por Webster e Watson (2002), denominada de busca reversa das referências (*backward references search*), com o objetivo de utilizar as “referências das referências”, ou seja, analisar as referências citadas pelos autores estudados, para ampliar o conhecimento sobre o fenômeno em estudo e ainda encontrar inconsistências na literatura. Após essa busca reversa, foram identificados mais 51 documentos. Para o início da análise desses documentos, foi observado se eles estavam disponíveis para leitura e se estavam nos idiomas português, inglês ou espanhol. Depois dessa verificação, restaram 44 documentos para a leitura do título, resumo, palavras-chave e método de pesquisa. Posteriormente à leitura desses 44 documentos, foram identificados 7 documentos que fazem a abordagem referentes ao *Lean* como uma filosofia de apoio na implementação da Indústria 4.0.

A partir da leitura desses 25 documentos, pôde-se identificar como os autores abordam as relações específicas entre cada prática do *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0. Partindo da análise das relações específicas entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0, em 03 de Fevereiro de 2022, foi realizada a segunda revisão sistemática, procurando identificar quais outros autores também analisam a interação ou relação (de maneira específica) entre cada prática do *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0 (Figura 22). Para essa pesquisa, utilizou-se a seguinte *string* de busca:

“industr* 4.0” AND lean AND (*pull* OR *Kanban* OR “*visual management*” OR *5S* OR *andon* OR *gemba* OR *poka-yoke* OR “*poka yoke*” OR *heijunka* OR *standardization* OR *standardization* OR “*continuous improvement*” OR *kaizen* OR *flow* OR “*continuous flow*” OR “*work organization*” OR “*people management*” OR

“team work” OR “set-up time” OR “partnership orientation” OR “orientation for partnership” OR “lean strategy” OR “lean strategies” OR “lean communication” OR “value stream map” OR “value stream map” OR “value stream mapping” OR vsm OR smed OR “quality management” OR waste OR “just-in-time” OR “just in time” OR jit OR “just-in-sequence” OR “just in sequence” OR jis OR “total productive maintenance” OR tpm OR “supplier integration” OR “integration with supplier* OR “customer* integration” OR “integration with customer* OR “value flow” OR “strive for perfection” OR jidoka OR 3P)*

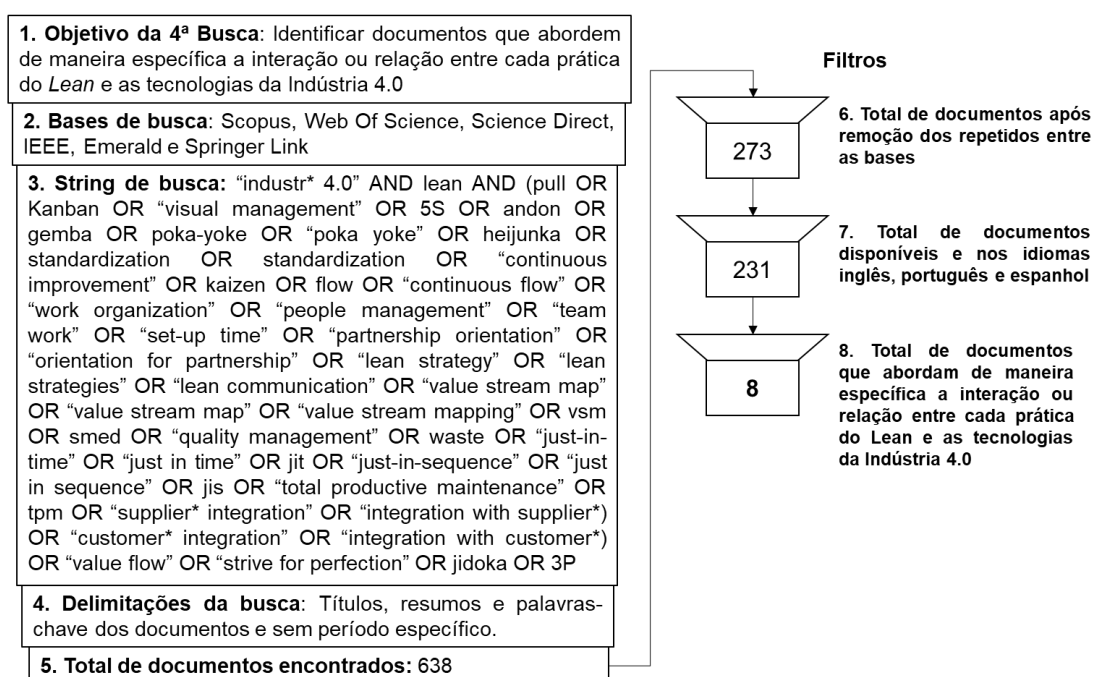


Figura 22 – Etapas da Revisão Sistemática da Literatura Referente às Interações específicas do *Lean* com a Indústria 4.0

Nessa pesquisa também foram utilizadas as bases de busca descritas nas revisões anteriores. A pesquisa foi realizada, considerando o título, as palavras-chave, e o resumo dos documentos e não foi especificado um período, pois o objetivo era identificar as interações ou relações (de maneira específica) entre o *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0, desde o início da utilização do termo Indústria 4.0. Foi identificado um total de 638 documentos (artigos acadêmicos, trabalhos apresentados em conferências e capítulos de livros) e, após a exclusão repetidos entre as bases, chegou-se a 273 documentos. Para o início da análise,

foi verificado se eles estavam disponíveis para leitura, se estavam nos idiomas português, inglês ou espanhol e se eles já haviam sido selecionados nas revisões sistemáticas realizadas previamente neste trabalho. Após essa verificação, restaram 231 documentos para a leitura do título, resumo, palavras-chave e método de pesquisa. Mediante tal leitura, chegou-se a um total de 8 documentos, que atendem ao objetivo desta revisão sistemática.

Portanto, considerando os dois documentos identificados na Seção 4.1.1 e os documentos selecionados nas duas revisões sistemáticas da literatura apresentadas nesta seção, chegou-se a um total de 35 documentos que são utilizados como base desta tese, sobre as interações ou relações específicas entre práticas Lean e tecnologias da Indústria 4.0 (Figura 23).

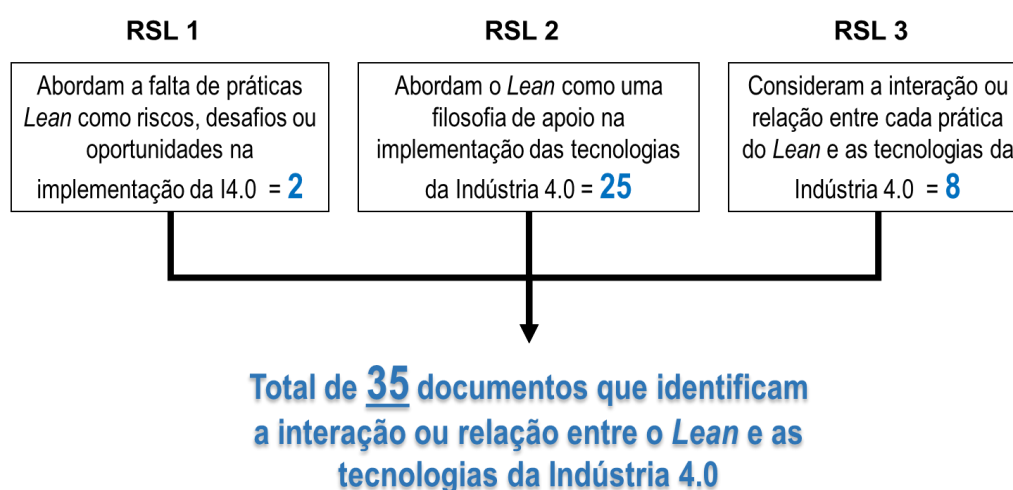


Figura 23 – Total de documentos que identificam a interação ou relação entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0

Assim, a partir da identificação dos 35 documentos pôde-se analisar os trabalhos nos quais os autores são específicos na relação entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.

Essa relação é apresentada no Quadro 19, com a respectiva lista de autores no Quadro 20.

Quadro 19: Relação entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0

Lean	Tecnologias da Indústria 4.0	Autores
VSM	1.Aprendizagem de Máquina; 2.Autoidentificação/RFID; 3.Big Data; 4.Computação em Nuvem; 5.CPS; 6.IoT; 7.Realidade Virtual; 8.Simulação; 9.Verificações e Análises em Tempo Real.	2; 3; 6; 16; 12; 15; 18; 22; 27; 32; 33.
Eliminação de Desperdícios	1.AGV; 2.Autoidentificação/RFID; 3.Big Data; 4.Computação em Nuvem; 5.CPS; 6.Digital Twin; 7.IoT; 8.Manufatura Aditiva; 9.Realidade Aumentada; 10.Sensorização; 11.Simulação.	4; 11; 23; 26; 29; 31.
Melhoria Contínua (Kaizen)	1.Big Data; 2.Computação em Nuvem; 3.Simulação; 4. Aprendizagem de Máquina.	5; 6; 15; 19; 27; 33.
JIT/JIS e Kanban	1.AGV; 2.Aprendizagem de Máquina; 3.Autoidentificação/RFID; 4.Big Data; 5.Computação em Nuvem; 6.CPS; 7.Digital Twin; 8.Dispositivos Móveis/Eletrônicos; 9.Embalagens Inteligentes; 10.IoT; 11.Manufatura Aditiva; 12.Memória Digital de Objetos; 13.Robotização; 14.Simulação.	1; 5; 3; 8; 10; 15; 16; 20; 26; 27; 29; 33; 34; 35.
Gestão à Vista (Visual Management)	1.Autoidentificação/RFID; 2.Dispositivos Móveis/Eletrônicos; 3.Interação Homem-Computador; 4.Realidade Aumentada; 5. IoT; 6. Big Data.	5; 8; 16; 26; 27; 28; 32.
Fluxo (Fluxo Contínuo)	1.CPS	8; 27.
TPM	1.Aprendizagem de Máquina; 2.Big Data; 3.Computação em Nuvem; 4.CPS; 5.Realidade Aumentada; 6.Realidade Virtual; 7.Sensorização; 8.Simulação.	5; 6; 9; 10; 15; 16; 29; 31; 32; 33.
Jidoka	1.Interação Homem-Máquina; 2.IoT; 3.Robotização; 4. CPS.	14; 24; 26; 27; 28.
Padronização	1.CPS; 2.Plug & Play; 3.Simulação.	5; 30.
Gestão de Pessoas	1.Interação Homem-Máquina; 2.Realidade Aumentada; 3.Sensorização; 4.Simulação; 5.Verificações e Análises em Tempo Real; 6.CPS; 7.Dispositivos Móveis/Eletrônicos; 8. <i>e-Learning</i>	7; 9; 21; 23; 24; 26; 29; 31.
Poka-Yoke	1.AGV; 2.Aprendizagem de Máquina; 3.Autoidentificação/RFID; 4.Computação em Nuvem; 5.CPS; 6.IoT; 7.Memória Digital de Objetos; 8.Realidade Aumentada.	8; 15; 16; 17; 26; 27; 29; 33.
Heijunka	1.Big Data; 2.Inteligência Artificial; 3.Realidade Virtual; 4.Sensorização.	5; 9; 10; 16; 21.
SMED	1. Plug & Produce; 2.Plug & Play; 3.Sensorização; 4. IoT.	8; 9; 27; 28; 29.
Integração com Fornecedores	1.Big Data; 2.IoT; 3. Computação em Nuvem.	5; 29; 31
Gemba	1.Realidade Aumentada; 2.Realidade Virtual.	25.
Integração com Clientes	1. Big Data; 2.Manufatura Aditiva.	5; 29; 31.

Quadro 20: Autores que indicam a relação entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0

	Autor	Ano	Título
1	Anosike et al.	2021	Lean manufacturing and internet of things – A synergetic or antagonist relationship?
2	Balaji et al.	2020	DVSMS: dynamic value stream mapping solution by applying IloT
3	Buer et al.	2018	The Link between Industrie 4.0 and Lean Manufacturing: Mapping Current Research and Establishing a Research Agenda
4	Butt	2020	A Strategic Roadmap for the Manufacturing Industry to Implement Industry 4.0
5	Ciano et al.	2021	One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study
6	Davies et al.	2017	Review of Socio-technical Considerations to Ensure Successful Implementation of Industry 4.0
7	Jarrahi et al.	2019	Facing the challenges of the future through the synergetic adoption of Industry 4.0 and Lean manufacturing
8	Kolberg e Zühlke	2015	Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies
9	Küpper et al.	2017	When lean meets Industry 4.0: the next level of operational excellence
10	Laaper e Kiefer	2020	Digital Lean Manufacturing: Industry 4.0 Technologies transform Lean processes to advance the enterprise
11	Lai et al.	2019	Industry 4.0 Enhanced Lean Manufacturing
12	Lugert et al.	2018	Dynamization of Value Stream Management by technical and managerial approach
13	Lugert et al.	2018	Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries
14	Ma et al.	2017	SLAE–CPS: Smart Lean Automation Engine Enabled by Cyber-Physical Systems Technologies
15	Marinelli et al.	2021	Lean manufacturing and industry 4.0 combinative application: Practices and perceived benefits
16	Mayr et al.	2018	Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0
17	Mrugalska et al.	2017	Towards Lean production in Industry 4.0
18	Pagliosa et al.	2021	Industry 4.0 and Lean Manufacturing: A systematic literature review and future research directions
19	Peças et al.	2021	PDCA 4.0: A new conceptual approach for continuous improvement in the industry 4.0 paradigm
20	Pekarcikova et al.	2020	Material Flow Optimization through E-Kanban System Simulation
21	Powell et al.	2018	Towards Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: Industry 4.0 Technologies as Enablers of Leaner Production
22	Ramadan et al.	2012	RFID- Enabled Dynamic Value Stream Mapping
23	Romero et al.	2018	Digital lean cyber-physical production systems: The emergence of digital lean manufacturing and the significance of digital waste
24	Romero et al.	2019	Rethinking jidoka systems under automation & learning perspectives in the digital lean manufacturing world
25	Romero et al.	2020	New Forms of Gemba Walks and Their Digital Tools in the Digital Lean Manufacturing World
26	Rosin et al.	2019	Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles
27	Saad et al.	2021	Industry 4.0 application in lean manufacturing- a systematic review
28	Salvadorinho e Teixeira	2021	Stories told by publications about the relationship between industry 4.0 and lean: Systematic literature review and future research agenda
29	Sanders et al.	2016	Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing
30	Sanders et al.	2017	Industry 4.0 and Lean Management – Synergy or Contradiction? A Systematic Interaction Approach to Determine the Compatibility of Industry 4.0 and Lean Management in Manufacturing Environment
31	Satoglu et al.	2017	Lean Production Systems for Industry 4.0
32	Shahin et al.	2020	Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises
33	Valamede e Akkari	2020	Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies
34	Wagner et al.	2017	Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems
35	Wang et al.	2016	Lean Intelligent Production System and Value Stream Practice

Para organizar a apresentação das tecnologias da Indústria 4.0 nesta tese, utilizou-se a definição da Acatech (2020) para a identificação das principais tecnologias ou tecnologias base da Indústria 4.0 e as definições de Geissbauer et al. (2016), Ghobakhloo (2018) e Küpper (2019), para a identificação das tecnologias de apoio (ou tendências tecnológicas) da Indústria 4.0. A escolha da Acatech deve-se ao índice de citações, pioneirismos e importância da instituição

nos estudos referentes à Indústria 4.0. Com relação aos autores de Geissbauer et al. (2016), Ghobakhloo (2018) e Küpper (2019), a escolha deve-se ao alto nível de citações identificado nas bases de busca.

A Figura 24 apresenta os elementos tecnológicos e as tecnologias de apoio da Indústria 4.0.



Figura 24: Elementos tecnológicos e as tecnologias de apoio da Indústria 4.0

4.2.2. DEFINIÇÃO DO MÉTODO OU FERRAMENTA PARA MEDIÇÃO DO GRAU DE MATURIDADE DO *LEAN*

Definiu-se a LESAT (*LAI Enterprise Assessment Tool*) como a ferramenta utilizada para a avaliação do grau de maturidade do *Lean*. Essa ferramenta foi desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), com o objetivo de auxiliar as empresas no processo de transformação, por meio de uma ferramenta estruturada que avalia as práticas *Lean*. A razão para a seleção dessa ferramenta baseia-se na análise de Nightingale (2001), Nightingale et al. (2012) e Krolla (2019) que afirmam que a LESAT fornece à liderança das empresas um suporte prático para a avaliação e tomada de decisão, considerando a transformação cultural e organizacional, gestão da mudança e

uma análise ou uma revisão das suas estratégias, com base nos resultados de maturidade das práticas *Lean*. Além disso, diferentemente de outras ferramentas de medição da maturidade do *Lean*, a LESAT avalia a empresas como um todo, faz uma análise das lacunas e identifica os próximos passos para a transformação *Lean*. Observa-se que essa afirmação se adequa ao objetivo desta tese, referente à proposta de um método que permita definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Dessa forma, das 54 práticas da LESAT, apresentadas no Quadro 16 da Seção 2.4., nesta tese serão utilizadas 37 para a avaliação da maturidade do *Lean*, de acordo com as práticas *Lean* identificadas na revisão sistemática da literatura (Quadro 19), que apresentam relação com as tecnologias da Indústria 4.0, ou seja, as 17 práticas restantes da LESAT não avaliam práticas *Lean* que apresentam relação com as tecnologias da Indústria 4.0. O Quadro 21 apresenta quais práticas da LESAT avaliam essas práticas *Lean*.

Quadro 21: Relação entre o *Lean* e as práticas da LESAT

<i>Lean</i>	Práticas da LESAT	<i>Lean</i>	Práticas da LESAT
VSM	I.C.1; I.C.2; I.C.3	Padronização	III.B.1
Eliminação de Desperdícios	I.E.2	Heijunka	II.E.2; III.B.3
Melhoria Contínua (Kaizen)	I.G.1; I.G.3; I.G.4; I.G.5	Poka-Yoke	II.E.2
JIT/JIS e Kanban	II.F.2	Gemba	I.B.2; I.B.3; I.B.4; I.G.2
Gestão à Vista (Visual Management)	I.D.3	SMED	III.B.3
Fluxo (Fluxo Contínuo)	II.E.2; III.A.4	Jidoka	I.D.6; II.D.3
TPM	II.F.4	Gestão de Pessoas	I.B.1; I.D.1; I.D.2; I.D.3; I.D.4; I.D.5; I.D.7; I.E.3; III.A.3; III.A.5
Integração com Fornecedores	I.A.3; II.D.1; II.D.2	Integração com Clientes	I.A.2; I.A.3; II.C.1; II.F.3; II.F.4

Assim, MIT (2001), apresenta que o VSM pode ser avaliado pela prática I.C.1, pois ela analisa se a empresa entende o estado atual do fluxo de valor e se a prática e a linguagem do VSM são reconhecidas como uma parte importante de um processo de melhoria iterativa. A prática I.C.2 avalia se os fluxos de informação foram racionalizados para garantir a interoperabilidade entre os

elementos da empresa. Analisa se os caminhos do fluxo de material foram simplificados e encurtados para melhorar o fluxo. E verifica se os fluxos de informações e de materiais atendem às necessidades dos *stakeholders*. Já a prática I.C.3, avalia se o fluxo de valor futuro reflete maneiras novas e aprimoradas de criar valor e minimizar atividades que não agregam valor. Além disso, a prática analisa se o projeto de um fluxo de valor futuro foi gerado para o fluxo de valor primário e seus processos de suporte.

Com relação a Eliminação de Desperdícios, a prática I.E.2 analisa se os recursos estão sendo disponibilizados para a eliminação de desperdícios. Analisa também se ocorre a identificação da causa raiz, e não apenas do sintoma, para a eliminação do desperdício, registrando e compartilhando as lições aprendidas (MIT, 2001).

Na Melhoria Contínua (Kaizen), a prática I.G.1 avalia se a empresa possui processos estruturados de melhoria contínua, implementados de forma consistente, de modo que sustentem as melhorias obtidas. Analisa também se o processo de melhoria contínua desafia as pessoas a lidar com a causa raiz, ao invés do sintoma. A prática I.G.3 avalia se a liderança apoia ativamente e está comprometida em garantir o sucesso das melhorias e se as ações positivas e o esforço realizado são reconhecidos e recompensados, mesmo que as melhorias não sejam totalmente bem-sucedidas. A prática I.G.4 analisa se as lições aprendidas das melhorias são documentadas, de maneira que as melhores práticas e sugestões são mantidas em um formato padrão, conciso e claro. Verifica também se foi estabelecido um processo formal, em toda a empresa, para capturar e reutilizar as lições aprendidas. Por fim, avalia se as lições aprendidas são revisadas periodicamente, com o objetivo de manter a relevância dessas informações. A prática I.G.5 avalia se os resultados do negócio refletem as melhorias implementadas, verifica se o planejamento estratégico leva em consideração os ganhos previstos com as melhorias e analisa se os ganhos obtidos, a partir da implementação das melhorias, são alavancados para alcançar crescimento, lucratividade, posição no mercado e estabilidade de emprego (MIT, 2001).

No JIT/JIS e *Kanban*, a prática II.F.2 avalia se as entregas são sincronizadas para minimizar a quantidade de mercadorias em trânsito. Analisa se a distribuição de componentes, a partir de baixos níveis de estoque, é acionada por um sistema interno (*Kanban*), de forma que alguns produtos são entregues diretamente ao ponto de uso, com inspeção limitada. Por fim, verifica se o ciclo de entrega se tornou mais curto e mais confiável (MIT, 2001).

Na Gestão à Vista, a prática I.D.3 avalia se dispositivos visuais são utilizados para acelerar o fluxo de comunicação e acessibilidade, e identifica se existe um sistema que permita a comunicação entre esses dispositivos (MIT, 2001).

No Fluxo Contínuo, a prática II.E.2 avalia se os trajetos do fluxo de material são identificados e os elementos-chave do *layout* foram reordenados, melhorando o fluxo e reduzindo o estoque em processo, com alguns fornecedores entregando no ponto de uso, quando apropriado. Já a prática III.A.4 avalia especificamente a capacidade dos sistemas de informação em facilitar e acelerar o fluxo de informação, ao longo do fluxo de valor (MIT, 2001).

Na TPM, a prática II.F.4 analisa se a coleta de dados, sobre tendências de falha, permite a determinação de pontos de intervalo de serviço para manutenção preventiva e uma redução dos níveis de peças sobressalentes (MIT, 2001).

Na Integração com Fornecedores, a prática I.A.3 avalia se o planejamento estratégico abrange toda a empresa, incluindo fornecedores. Analisa se os riscos e as responsabilidades são compartilhados com os fornecedores e parceiros da empresa. E verifica se a integração e o equilíbrio dos valores dos *stakeholders* são alcançados por meio de relações colaborativas com fornecedores e parcerias estratégicas. A prática II.D.1 avalia se a rede de fornecedores é definida e desenvolvida em linha com o plano estratégico, para garantir a criação de valor eficiente para todos os *stakeholders* da empresa. Analisa se a experiência e as capacidades do fornecedor complementam as competências essenciais da empresa. Verifica se a rede de fornecedores é flexível e pode se adaptar rapidamente às mudanças de requisitos e interrupções imprevistas. A prática II.D.2 avalia se processos formais estão em vigor para avaliação e aprovação de fornecedores. Verifica se os papéis e responsabilidades são

claramente definidos, com relação aos termos contratuais e no compartilhamento de riscos e recompensas. Analisa se a produção e a entrega de materiais são sincronizadas em toda a base de fornecedores, garantindo um fluxo contínuo, com desperdício mínimo (MIT, 2001).

Na Padronização, a prática III.B.1 avalia se a força de trabalho desempenha um papel significativo na concepção de processos e práticas padrão, que são respeitados e atualizados periodicamente. Analisa se as melhorias de processo são documentadas em um formato padrão conciso, fácil de usar e fácil de ser compartilhado. Verifica também se os processos são padronizados (quando possível) em toda a empresa (MIT, 2001).

No *Heijunka*, a prática II.E.2 avalia se, por meio da estabilização dos processos e reduções de variações, a empresa está alcançando ganhos referentes à redução dos níveis de estoque e eficiência operacional. Dessa forma, é avaliado se o trabalho está segmentado e organizado ao longo dos fluxos de valor, visando alcançar um sistema de produção livre de defeitos, por meio da implementação do sistema *Pull*. Já a prática III.B.3, avalia se os altos níveis de estabilidade do processo são mantidos, mediante a utilização de técnicas à prova de erros e identificação de causa raiz dos problemas. Assim, espera-se que as reduções de variação alcançadas permitam prazos de entrega previsíveis e mais curtos, para ambos os fluxos de informações e materiais (MIT, 2001).

Na *Poka-Yoke*, a prática II.E.2 avalia se a empresa é capaz de estabelecer e manter um sistema de produção *Lean*, livre de defeitos. Dessa maneira, a prática analisa se o sistema de produção é segmentado e organizado ao longo dos fluxos de valor, produzindo itens com qualidade, que são entregues com mínima inspeção de recebimento para o uso do cliente (MIT, 2001).

No *Gemba*, a prática I.B.2 avalia se existe um compromisso comum, por parte dos líderes, que apoia transformação, em busca de uma organização *Lean*, reconhecendo as ações positivas, de forma que a liderança sênior atua ativamente como “*champions*” da transformação. A prática I.B.3 avalia se o papel que o *Lean* desempenha para alcançar a transformação é demonstrado e está claramente definido pela liderança. A visão da transformação foi comunicada a

todos os níveis e tem ampla aceitação por parte da maioria dos funcionários. Além disso, essa visão incorpora um novo modelo mental de como a empresa agiria e se comportaria de acordo com as práticas *Lean*. A prática I.B.4 avalia se foi desenvolvido e comunicado um caso real de negócio, que engloba práticas *Lean*. Analisa, também, se o progresso da transformação *Lean* é parte integrante das discussões e eventos da liderança. Por fim, a prática I.G.2 avalia se o progresso da transformação *Lean* é avaliado pelos benefícios agregados e não por melhorias individuais ou localizadas. Verifica se os líderes participam ativamente no monitoramento do progresso da implementação e no tratamento das deficiências do plano de transformação. Avalia se as análises de progresso do *Lean* são documentadas e frequentemente disseminadas, em um formato comum (MIT, 2001).

No SMED, a prática III.B.3 analisa se as ferramentas para a redução de variações no processo (como a SMED) são aplicadas em toda a organização. Com isso, espera-se encontrar benefícios como a redução do tempo de ciclo, redução de inventário e maior estabilidade no processo (MIT, 2001).

No *Jidoka*, a prática I.D.6 avalia se existe um plano de inovação (que inclua tecnologia) no processo de transformação da empresa. Assim, espera-se que seja identificado um programa abrangente de inovação, em que o resultado é reconhecido em toda a empresa. Já a prática II.D.3 avalia se existe um processo que facilite o compartilhamento e transferência de inovação, conhecimento e tecnologia. Assim, espera-se que se tenha desenvolvido roteiros para a implementação e compartilhamento de tecnologias (MIT, 2001).

Na Gestão de Pessoas, a prática I.B.1 avalia se foi estabelecido um processo formal de educação *Lean* para líderes seniores; se os líderes aplicam e usam regularmente as lições aprendidas no *Lean*; e se a maioria dos líderes recebeu exposição e educação significativas nas práticas e comportamento *Lean*. A prática I.D.1 avalia se as barreiras funcionais foram minimizadas; se há um amplo uso de processos multifuncionais em toda a empresa; e se o potencial de progressão na carreira existe tanto em processos quanto em funções. Já a prática I.D.2 avalia se as barreiras de comunicação, com base no cargo ou

função, foram reduzidas significativamente; e se as relações estáveis e cooperativas existem entre a maioria dos *stakeholders* da empresa. A prática I.D.3 avalia se existem comunicações abertas e oportunas entre os *stakeholders*, por exemplo, por meio de reuniões regulares com funcionários, boletins informativos, etc. Analisa se a tecnologia foi utilizada para acelerar o fluxo de comunicações e acessibilidade, enquanto filtra as comunicações desnecessárias. Verifica se a contribuição do funcionário é valorizada e desempenha um papel fundamental na tomada de decisões. A prática I.D.4 avalia se os gerentes e supervisores atuam como mentores e educadores, promovendo a tomada de decisões em todos os níveis da organização. Verifica se a extensão e os tipos de capacitação são adaptados para corresponder ao ambiente e às pessoas capacitadas. Analisa se o *empowerment* permite uma tomada de decisão rápida e eficaz, mais próxima do ponto de uso. A prática I.D.5 avalia se os incentivos incluem um equilíbrio entre recompensas e reconhecimentos não monetários, a fim de encorajar a atividade *Lean*. Analisa se os incentivos são baseados em medidas de desempenho que estimulam a atividade *Lean* e se estimulam as melhorias locais que irão beneficiar vários processos ou valorizar o desempenho do fluxo de valor. A prática I.D.7 avalia se os agentes de mudança do *Lean* foram designados. Analisa se esses agentes de mudança operam em todas as áreas e fazem transferências cruzadas de experiência, com relação a implementação do *Lean*. Verifica se foi estabelecido o processo de desenvolvimento de *experts* em *Lean* e de outros agentes de mudança. A prática I.E.3 avalia se os programas de educação e treinamento, incluindo atualizações, são fornecidos na hora certa; se a educação e o treinamento têm um conjunto equilibrado e sequenciado de elementos para apoiar o plano de transformação *Lean*; se a aplicação das práticas *Lean* aprendidas em treinamento é avaliada formalmente. A prática III.A.3 avalia se o capital intelectual é considerado um ativo corporativo; se os funcionários têm planos de treinamento individuais, que estão alinhados aos requisitos da base de habilidades atuais e projetados; se os funcionários capturam e incorporam ativamente as lições aprendidas em treinamentos. Por fim, a prática III.A.5 avalia se as questões de saúde e segurança são tratadas rotineiramente nas atividades

de melhoria conduzidas pelos funcionários; se os processos e projetos são adaptados de forma proativa para minimizar os problemas ambientais, de saúde e segurança, na origem; e se os projetos atendem às regulamentações ambientais atuais e podem ser facilmente adaptados para atender às mudanças projetadas ao longo do ciclo de vida do produto (MIT, 2001).

Na integração com clientes, a prática I.A.2 avalia se a empresa possui um processo formal para determinar o valor do cliente; se entende o que constitui o sucesso para seus clientes; se existe um processo formal para medir e avaliar a satisfação do cliente; e se o valor do cliente influencia fortemente as políticas, práticas e comportamento. Já a prática I.A.3 avalia se o planejamento estratégico é fortemente influenciado pelo valor do cliente; e se o planejamento estratégico abrange toda a empresa, incluindo o cliente. A prática II.C.1 avalia se as entradas (*inputs*) do cliente são usadas ativamente em todo o processo de desenvolvimento e se os projetos atendem aos requisitos de valor do cliente, sem funcionalidades desnecessárias. A prática II.F.3 avalia se os processos de suporte ao cliente foram padronizados e são regularmente revisados, com base no *feedback* do cliente. Por fim, a prática II.F.4 avalia se o *feedback* do cliente é mantido de forma proativa e usado para prever quaisquer problemas de serviços e para aprimorar projetos futuros (MIT, 2001).

O Quadro 22 apresenta as 37 práticas da LESAT selecionadas para avaliação da maturidade das práticas *Lean*.

Quadro 22: Práticas da LESAT para avaliação da maturidade do Lean

Processos Empresariais	Grupo Básico - Transformação Lean/Liderança		Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	
	Práticas Lean	Indicadores Lean						
I.A Planejamento estratégico empresarial	I.A.2. Foco no valor do cliente	<ul style="list-style-type: none"> A empresa emprega um processo formal para determinar o valor do cliente. A empresa entende o que constitui sucesso para seus clientes. Existe um processo formal para medir e avaliar a satisfação do cliente. O valor para o cliente influencia fortemente as políticas, práticas e comportamento. 	O meio de definir valor para o(s) cliente(s) é informal e não estruturado.	Processo estruturado para definição de valor e aplicação a clientes selecionados.	Como a empresa pode contribuir melhor para o sucesso do cliente está bem definida e incorporada na maioria dos projetos/programas.	A definição de valor pelo cliente influencia fortemente a direção estratégica.	A competitividade é aprimorada à medida que o valor para o cliente se torna a força motriz predominantemente em toda a empresa estendida.	
	I.A.3. Alavancando toda a empresa	<ul style="list-style-type: none"> O planejamento estratégico é fortemente influenciado pelo valor das partes interessadas e do cliente. O planejamento estratégico abrange toda a empresa, incluindo cliente, alianças / parceiros, funcionários e fornecedores. O risco e as responsabilidades são repartidos ao alavancar os fornecedores e parceiros da empresa. 	As relações com clientes e fornecedores refletem uma mentalidade "Nós-Eles".	Oportunidades iniciais identificadas para estabelecer vínculos corporativos estendidos.	O processo de planejamento estratégico inclui explicitamente a consideração das principais partes interessadas nos fluxos de valor.	A integração e o equilíbrio dos valores das partes interessadas são alcançados por meio de relações colaborativas com fornecedores e parceiros estratégicas.	A integração da empresa estendida contribui para a inovação, crescimento, aumento da lucratividade e posição de mercado.	
	I.B.1. Aprendizagem e educação em Lean para líderes empresariais	<ul style="list-style-type: none"> Foi estabelecido um processo formal de educação sobre o Lean para líderes seniores. Os líderes aplicam e usam regularmente as lições aprendidas no "Lean". A maioria dos líderes empresariais recebeu exposição e educação significativas nos princípios, práticas e comportamento Lean. 	Pouco interesse em aprender os princípios lean é evidente entre a liderança empresarial.	Os líderes estão buscando ativamente oportunidades para aprender sobre o lean. Há uma compreensão inicial da extensão da mudança de paradigma para a empresa.	Os líderes estão adotando o aprendizado enxuto e aplicando continuamente os princípios enxutos em toda a empresa.	Os líderes contribuem para o desenvolvimento/refinamento do corpo de conhecimento sobre lean.	Os líderes seniores estão defendendo a transformação para lean dentro da empresa.	As lições aprendidas na implementação do lean são compartilhadas ativamente em toda a organização e dentro da empresa estendida.
I.B Adote o Paradigma Lean	I.B.2. Compromisso da alta administração	<ul style="list-style-type: none"> Existe um compromisso consensual de apoiar uma transformação para o Lean. A gestão fornece suporte e reconhecimento por ações positivas A alta administração e campeã (champion) na transformação da empresa. 	O nível de comprometimento entre líderes seniores e a administração é variável - alguns endossam, enquanto outros podem resistir ativamente.	A alta administração compra o compromisso do grupo: líderes/gerentes seniores que não podem ou não querem se adaptar são substituídos.	"Lean" é essencial para reuniões de toda a empresa, reuniões de equipe sênior, etc.. Os gerentes seniores lideram pessoalmente e por meio da visivelmente a transição lean.	Os líderes seniores e a gestão orientam e promovem os campeões lean internamente e por meio da empresa estendida.	Os líderes seniores e a gestão orientam e promovem os campeões lean internamente e por meio da empresa estendida.	
	I.B.3 Visão da Empresa Lean	<ul style="list-style-type: none"> O papel que o Lean desempenha para alcançar a visão está claramente definido. A visão foi comunicada a todos os níveis e tem ampla adesão da maioria dos funcionários. A visão incorpora um novo modelo mental de como a empresa agiria e se comportaria de acordo com os princípios e práticas Lean. Um caso de negócio atrativo para o Lean foi desenvolvido e comunicado. As implicações e escalas de tempo da visão foram traduzidas para cada área da empresa. O progresso da transformação Lean é parte integrante das discussões e eventos de liderança. 	Os líderes seniores têm visões variadas do lean, de nenhuma a bem definida.	Os líderes seniores adotam uma visão comum do lean.	A visão Lean foi comunicada e é compreendida pela maioria dos funcionários.	A visão comum do lean é compartilhada pela empresa estendida.	As partes interessadas internalizaram a visão enxuta e são uma parte ativa para alcançá-la.	As partes interessadas internalizaram a visão enxuta e são uma parte ativa para alcançá-la.
I.C Foco no Fluxo de Valor	I.B.4. Senso de urgência	<ul style="list-style-type: none"> Um processo formal foi estabelecido para identificar o valor do cliente e das partes interessadas. A prática e a linguagem do mapeamento do fluxo de valor são reconhecidas como uma parte importante de um processo de melhoria iterativa. Os fluxos de valor atuais dos principais clientes / linhas de produtos foram mapeados e pontos de entrega e interfaces claramente definidos. 	A varredura do ambiente identifica as ameaças competitivas e a necessidade de ação.	Os líderes seniores da empresa desenvolvem um caso urgente e convincente para a transformação lean.	Os principais fluxos de valor atuais são definidos, permitindo a identificação de interações críticas. Oportunidades significativas de eliminação de desperdícios e criação de valor são identificadas e alinhadas aos objetivos estratégicos.	O argumento urgente e convincente para o lean é expandido e aceito pelos principais tomadores.	O argumento urgente e convincente para o lean é expandido e aceito em toda a empresa estendida.	O argumento urgente e convincente para o lean é expandido e aceito em toda a empresa estendida.
	I.C.1. Compreender o fluxo de valor atual	<ul style="list-style-type: none"> Os fluxos de informações foram racionalizados para garantir a interoperabilidade entre os elementos da empresa. Os caminhos do fluxo de material foram simplificados e encurtados para melhorar o fluxo. Os fluxos de informações e materiais atendem às necessidades das partes interessadas. 	O fluxo de processo documentado difere do fluxo real. Há uma compreensão inicial da necessidade de mapeamento e análise formal.	Os principais interessados e o que eles valorizam são identificados. Os processos atuais estão mapeados e a análise inicial está em andamento.	Os principais fluxos de valor atuais são definidos, permitindo a identificação de interações críticas. Oportunidades significativas de eliminação de desperdícios e criação de valor são identificadas e alinhadas aos objetivos estratégicos.	A profundidade e amplitude do conhecimento dos elementos do fluxo de valor e dos processos de suporte expõe as interdependências em toda a empresa.	Fluxos de valor atualizados e suas interdependências são avaliados em toda a empresa estendida.	Fluxos de valor atualizados e suas interdependências são avaliados em toda a empresa estendida.
	I.C.2. Fluxo empresarial	<ul style="list-style-type: none"> Os fluxos de informações foram racionalizados para garantir a interoperabilidade entre os elementos da empresa. Os caminhos do fluxo de material foram simplificados e encurtados para melhorar o fluxo. Os fluxos de informações e materiais atendem às necessidades das partes interessadas. 	Os fluxos de material e informação são desconexos e "otimizamos" processo a processo. A mentalidade de "empurrar" prevalece.	Alguns caminhos de fluxo primários foram revisados para superar barreiras significativas ao fluxo.	Os caminhos de fluxo primários são simplificados e alinhados ao(s) fluxo(s) de valor, o que permite que informações e materiais fluam conforme necessário.	Os caminhos de fluxo primários são simplificados e alinhados ao(s) fluxo(s) de valor, o que permite que informações e materiais fluam conforme necessário.	Materiais e informações fluem perfeitamente por toda a empresa.	O material e as informações fluem de forma transparente e responsiva em toda a empresa estendida.
I.C.3. Projetando o fluxo de valor futuro	<ul style="list-style-type: none"> Um processo formal foi estabelecido para identificar como a empresa pode entregar melhor valor aos clientes e partes interessadas. O (s) fluxo (s) de valor futuro (s) reflete (m) maneiras novas e aprimoradas de obter valor e minimizar atividades que não agregam valor. Objetos de fluxo (s) de valor futuro foram gerados para o (s) fluxo (s) de valor primário e seus processos de suporte. 	A administração entende que os processos atuais não atendem aos objetivos futuros da empresa enxuta.	Um conceito para o design de fluxo(s) de valor futuro foi criado com base em requisitos equilibrados das partes interessadas.	O(s) fluxo(s) de valor futuro (s) que abrangem os objetivos empresariais futuros e satisfazem os requisitos das partes interessadas.	Os fluxos de valor futuros são refinados para acomodar um ambiente em mudança.	Os fluxos de valor futuros são refinados para acomodar um ambiente em mudança.	Os fluxos de valor futuros são refinados para acomodar dinamicamente um ambiente em mudança em toda a empresa estendida.	Os fluxos de valor futuros são refinados para acomodar dinamicamente um ambiente em mudança em toda a empresa estendida.

Quadro 22: Práticas da LESAT para avaliação da maturidade do Lean (cont.)

Processos Empresariais	Grupo Básico - Transformação Lean/Liderança					Nível 5	
	Práticas Lean	Indicadores Lean					
I.D. Desenvolver estrutura e comportamento Lean	I.D.1. Orientação organizacional empresarial	<ul style="list-style-type: none"> As barreiras funcionais foram minimizadas. Há amplo uso de processos multifuncionais em toda a empresa. O potencial de progressão na carreira existe tanto em processos quanto em funções. 	A empresa opera como silos funcionais.	Esforços iniciais estão em andamento para identificar as barreiras funcionais e entender todas as suas implicações.	Os processos organizacionais multifuncionais parcialmente implantados estão alinhados com o(s) fluxo(s) de valor da empresa.	Amplios processos multifuncionais são implementados em toda a empresa. As unidades funcionais agora servem como centros de conhecimento para retenção de habilidades.	A orientação multifuncional e baseada em processos está implementada em toda a empresa estendida.
	I.D.2. Relações baseadas na confiança mútua	<ul style="list-style-type: none"> As barreiras de comunicação com base na posição organizacional foram reduzidas significativamente. Relações estáveis e cooperativas existem entre a maioria das partes interessadas da empresa. 	Os relacionamentos tendem a ser determinados pelo papel organizacional, resultando em uma perspectiva "nós-eles".	A aplicação seletiva da perspectiva empresarial resulta na quebra de barreiras organizacionais e no desenvolvimento da confiança mútua.	Existem relacionamentos estáveis e cooperativos em toda a empresa. Relações de cooperação são estabelecidas com alguns parceiros empresariais.	O respeito e a confiança mútua existem em toda a empresa estendida com o compartilhamento equitativo dos benefícios das iniciativas de melhoria contínua.	As partes interessadas modificam o comportamento para melhorar o desempenho da empresa estendida (ganha-ganha).
	I.D.3. Comunicações abertas e oportunas	<ul style="list-style-type: none"> Existem comunicações abertas e oportunas entre as partes interessadas, por exemplo, reuniões regulares com funcionários, boletins informativos, etc. A tecnologia foi aproveitada para acelerar o fluxo e a acessibilidade das comunicações, ao mesmo tempo que filtra as comunicações desnecessárias. A opinião dos funcionários é valorizada e desempenha um papel fundamental na tomada de decisões. 	A comunicação é em grande parte de cima para baixo, limitada e atrasada.	Mecanismos básicos de comunicação são desenvolvidos, mas não são uniformes; estratégia de comunicação está em desenvolvimento.	Os líderes empresariais são acessíveis e visíveis, desenvolvendo comunicações bidirecionais de forma aberta, concisa e oportuna.	Os processos de comunicação estão passando por um refinamento contínuo e as informações são trocadas ou podem ser extraídas conforme necessário.	Um sistema abrangente de comunicação bidirecional é empregado em toda a empresa estendida.
	I.D.4. Empoderamento do funcionário	<ul style="list-style-type: none"> Gerentes e supervisores atuam como mentores e educadores, promovendo a tomada de decisões de nível inferior. A extensão e os tipos de capacitação são adaptados para corresponder ao ambiente e às pessoas capacitadas. A capacitação permite uma tomada de decisão rápida e eficaz mais próxima do ponto de uso. 	A tomada de decisão centralizada ocorre em uma estrutura hierárquica com delegação limitada de autoridade.	Estrutura e treinamento apropriados estão sendo implementados para permitir o empoderamento.	O ambiente organizacional e o sistema de gerenciamento suportam a tomada de decisão limitada no ponto de aplicação e necessidade.	Os processos de decisão são continuamente refinados para promover maior responsabilidade e propriedade no ponto de uso.	A tomada de decisões em toda a empresa estendida é delegada ao ponto de aplicação.
	I.D.5. Alinhamento de incentivos	<ul style="list-style-type: none"> Os incentivos incluem um equilíbrio de dinheiro e recompensas / reconhecimento não monetários para encorajar a atividade Lean. Os incentivos são baseados em medidas de desempenho que estimulam a atividade Lean. Os incentivos encorajam melhorias locais que irão beneficiar vários processos ou desempenho do fluxo de valor. 	Há uso esporádico de incentivos e uma consciência de que alguns incentivos desencorajam o comportamento Lean.	Incentivos que recompensam e incentivam o comportamento Lean são implantados em algumas áreas.	A remuneração dos executivos e os incentivos aos funcionários estão diretamente ligados ao alcance dos objetivos Lean.	Os sistemas de incentivo contribuem com sucesso para a realização e sustentabilidade dos objetivos Lean.	Os incentivos Lean são implantados, com sucesso mensurável em toda a empresa estendida.
I.E. Criar e Refinar o Plano de Implantação	I.D.6. Incentivo à inovação	<ul style="list-style-type: none"> O processo de revisão de sugestões foi simplificado e dá visibilidade clara do andamento de cada sugestão. Os programas de sugestões foram devidamente incentivados para dar reconhecimento aos criadores de ideias inovadoras. 	As iniciativas de inovação são esporádicas e ad hoc; segurança, estabilidade e aversão ao risco impulsionam a maioria das tomadas de decisão.	Esforços iniciais estão em andamento para desenvolver sistemas, processos e procedimentos para promover inovações.	Iniciativas de inovação estão florescendo em toda a empresa; a tomada de risco prudente é incentivada e recompensada.	Um programa abrangente de inovação é implementado e os resultados positivos são reconhecidos em toda a empresa.	
	I.D.7. Agentes de mudança Lean	<ul style="list-style-type: none"> Agentes de mudança Lean foram designados e autorizados. Agentes de mudança Lean operam em todas as áreas e fazem transferência cruzada de experiência de implantação Lean. O processo para desenvolver "mestres Lean" e outros agentes de mudança foi estabelecido. 	Os agentes de mudança são distribuídos esporadicamente, mas sem autoridade de mudança.	Há identificação formal dos agentes de mudança, juntamente com definição de papéis, delegação de autoridade e programa de educação e treinamento para agentes de mudança.	Agentes de mudança devidamente qualificados são designados para áreas-chave com autoridade para efetuar mudanças.	Os agentes de mudança estão fornecendo um recurso crítico de conhecimento, habilidade e experiência Lean na transformação da empresa estendida.	
	I.E.2. Dedicar recursos para melhorias do Lean	<ul style="list-style-type: none"> Os recursos estão comprometidos em apoiar o nível e a velocidade da transformação Lean requerida. Tempo para desenvolver melhorias por meio da contribuição pessoal é concedido em todos os níveis. O procedimento de solicitação de recursos de melhoria foi simplificado, priorizando melhorias que beneficiem múltiplas áreas. 	Pouco ou nenhum recurso é fornecido para melhoria do processo ou eliminação de resíduos.	Recursos limitados de nível corporativo são frequentemente aplicados com sintomas em vez da causa raiz.	Os recursos são alocados conforme necessário para a execução do plano de transformação Lean e priorizados em todo o fluxo de valor.	Um conjunto de recursos destinados é fornecido para iniciativas Lean com o mínimo de justificativa necessária.	Um conjunto de recursos destinados é fornecido para iniciativas enuvas em toda a empresa estendida.
I.E.3. Fornece educação e treinamento	<ul style="list-style-type: none"> Programas de educação e treinamento, incluindo atualizações, são fornecidos na hora certa. A educação e o treinamento têm um conjunto equilibrado e sequenciado de elementos para apoiar o plano de transformação Lean. A aplicação dos princípios Lean aprendidos em treinamento e educação é formalmente avaliada. 	Há pouca coordenação de programas de educação e treinamento para facilitar a mudança.	A educação e a formação abrangem um conjunto de competências necessárias para apoiar os projetos de transformação Lean.	O programa de educação e treinamento é composto por um conjunto equilibrado e sequenciado de elementos para apoiar o plano de transformação coordenado.	A educação e o treinamento em todos os níveis são revisados periodicamente para verificar o alinhamento e a adequação ao plano de transformação Lean.	O programa de educação e treinamento atende às necessidades futuras do plano estendido de transformação empresarial.	

Quadro 22: Práticas da LESAT para avaliação da maturidade do Lean (cont.)

Processos Empresariais	Grupo Básico - Transformação Lean/Liderança					Nível 5	
	Práticas Lean	Indicadores Lean			Nível 1		Nível 2
I.G Foco na Melhoria Contínua	I.G.1. Processo estruturado de melhoria contínua	<ul style="list-style-type: none"> Uma abordagem consistente de melhoria / transformação é implementada, sustentando as melhorias obtidas. O processo de melhoria continua desafia as pessoas a lidar com a causa raiz, ao invés do sintoma. Os princípios Lean estão sendo aplicados à maioria dos sistemas e processos corporativos, utilizando as lições aprendidas. 	<ul style="list-style-type: none"> Os líderes empresariais não estão ativamente envolvidos na revisão do progresso geral do plano de implementação lean. 	Um processo de melhoria para a empresa é amplamente definido e aplicado de forma seletiva.	Metodologia sistemática e estruturada para melhoria contínua e criação de valor é desenvolvida e implantada em muitas áreas.	O processo estruturado de melhoria contínua está totalmente enraizado em toda a empresa estendida.	
							I.G.2. Monitorando o progresso do Lean
	I.G.3. Nutrido o processo	<ul style="list-style-type: none"> Há uma consciência crescente de que a implementação bem-sucedida do lean é altamente dependente do apoio e encorajamento da alta administração. 	Alguns gerentes seniores estão fornecendo incentivo, apoio e reconhecimento, o que não é consistente em toda a empresa.	Os gerentes procuram identificar e remover as barreiras à implementação lean. Equipes e indivíduos que implementam com sucesso as práticas lean são reconhecidos e recompensados.	Executivos e gerentes seniores defendem e nutrem uma cultura de melhoria contínua na empresa estendida.		
						I.G.4. Capturando lições aprendidas	<ul style="list-style-type: none"> As lições aprendidas das atividades de melhoria não são documentadas, residindo apenas nas memórias dos participantes.
	I.G.5. Impacto no planejamento estratégico da empresa	<ul style="list-style-type: none"> Os resultados do negócio refletem as melhorias resultantes da implantação do Lean. O planejamento estratégico leva em consideração os ganhos previstos com as melhorias Lean. Os ganhos obtidos com a implantação do Lean são alavancados para alcançar crescimento, lucratividade, posição no mercado e estabilidade de emprego. 	Os benefícios da implementação enxuta estão começando a influenciar o processo de planejamento estratégico.	A administração executiva considera o impacto potencial das iniciativas de melhoria de desempenho em sua avaliação de novas oportunidades de negócios.	As melhorias previstas da implementação enxuta são incorporadas ao planejamento empresarial e às decisões orçamentárias.		

Quadro 22: Práticas da LESAT para avaliação da maturidade do *Lean* (cont.)

Grupo Básico - Processos de Ciclo de Vida		Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Processos Empresariais	Práticas Lean					
II.A. Aquisição de negócios e gerenciamento de programas	II.A.2. Otimizar a capacidade e a utilização de ativos	<ul style="list-style-type: none"> A utilização de pessoas e bens materiais é otimizada dentro das unidades funcionais. 	Há evidências de cooperação ad hoc entre unidades funcionais para eliminar desperdícios e compartilhar recursos.	Uma abordagem corporativa fornece alocação de ativos consistente e equilibrada em todo o fluxo de valor.	Como resultado da aplicação de conceitos e técnicas enxutas, os ativos são liberados para serem aplicados em toda a empresa para dar suporte às atividades atuais ou de crescimento.	Existe a capacidade de transferir ou desinvestir recursos com facilidade e rapidez para novas oportunidades.
	II.C. Desenvolver produto e processo	<ul style="list-style-type: none"> As entradas do cliente são capturadas apenas no início do desenvolvimento. 	As contribuições dos clientes são consideradas qualitativamente por meio de contatos de alto nível e revisões ocasionais.	O(s) cliente(s) são formalmente representados em Equipes Integradas de Produto (IPT) e existem mecanismos de feedback para facilitar as iterações de projeto oportunas.	O(s) cliente(s) estão envolvidos(s) ativamente com o IPT em vários níveis para melhorar conjuntamente a eficácia e a qualidade do projeto do produto e do processo.	O(s) cliente(s) estão envolvidos(s) rotineiramente com o IPT com comunicação efetiva e contínua. A repartição de benefícios está bem estabelecida, a quantificação do valor e as compensações são uma parte contínua e automática do processo.
II.D. Gestão da cadeia de suprimentos	II.C.1. Incorporar o valor do cliente ao design de produtos e processos	<ul style="list-style-type: none"> Grande número de fornecedores diretos em uma estrutura hierárquica. Há pouca evidência de uma estratégia de fornecedor definida e conhecimento limitado dos relacionamentos dentro da rede de fornecedores. 	A base de fornecedores foi racionalizada para focar em fornecedores-chave com alto impacto nos objetivos estratégicos.	A rede de fornecedores é definida com base na análise estratégica dos processos de criação de valor internamente e entre fornecedores.	As decisões estratégicas de terceirização e compra se concentram em alcançar uma combinação ideal de competências essenciais tanto dentro da empresa quanto em toda a rede de fornecedores.	A rede de fornecedores é definida, desenvolvida e integrada para garantir a criação eficiente de valor para as partes interessadas da empresa durante todo o ciclo de vida do produto.
	II.D.2. Otimizar o desempenho de toda a rede	<ul style="list-style-type: none"> Os relacionamentos com fornecedores são distantes e contaditórios. O departamento de compras gerencia um grande número de contratos de curto prazo e de menor oferta. 	Processos formais estão em vigor para avaliação e aprovação do fornecedor. Os contratos de compra de longo prazo focam na redução de custos. Visibilidade limitada dos processos de negócios do fornecedor.	Objetivos, funções e responsabilidades comuns são estabelecidos e comunicados, com fornecedores ou alianças estratégicas. Envolvimento precoce dos principais fornecedores no projeto e desenvolvimento.	Alianças estratégicas com fornecedores-chave enfatizam um alto grau de compartilhamento de informações, compartilhamento de riscos e compartilhamento de benefícios. Para outros, existe um conjunto diferenciado de estratégias e práticas. A produção e a entrega são sincronizadas em toda a rede de fornecedores.	Os recursos do fornecedor são otimizados dinamicamente para garantir a criação de valor eficiente e construir uma vantagem competitiva durável, criando flexibilidade e capacidade de resposta às mudanças no mercado.
II.D.3. Promover a inovação e o compartilhamento do conhecimento em toda a rede de fornecedores	II.D.3. Promover a inovação e o compartilhamento do conhecimento em toda a rede de fornecedores	<ul style="list-style-type: none"> Foco principal nas capacidades internas, com pouco conhecimento do conhecimento tácito (baseado na experiência) ou explícito (formal) entre os fornecedores. 	Estruturas e processos organizacionais internos são estabelecidos para avançar o conhecimento e a inovação baseados no fornecedor.	Os roteiros de tecnologia incluem fornecedores em busca de uma visão estratégica comum. Métricas compartilhadas para melhoria contínua são utilizadas.	Mecanismo de transferência de conhecimento é criado para acesso aberto e rápido em toda a rede de fornecedores.	Acordos mutuamente benéficos são estabelecidos para promover a inovação entre os fornecedores. Existe um processo para comunicação contínua das mudanças necessárias na visão, estratégia, métricas e implementação.

Quadro 22: Práticas da LESAT para avaliação da maturidade do *Lean* (cont.)

Grupo Básico - Processos de Ciclo de Vida		Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Processos Empresariais	Práticas Lean	Indicadores Lean				
III.E. Produzir o Produto	III.E.2. Estabelecer e manter um sistema de produção <i>Lean</i>	<ul style="list-style-type: none"> • A conversão para o <i>Lean</i> liberou espaço físico, equipamentos, recursos humanos e capital para reimplantação. • Os níveis de estoque foram reduzidos em linha com os ganhos obtidos para a estabilidade do processo e reduções de variação. • O trabalho é executado apenas quando "puxado" dos "clientes" subsequentes na cadeia de valor. 	<p>O sistema de produção opera em uma programação de lote e fila com alto estoque em processo, com qualidade baseada na inspeção e não na prevenção.</p>	<p>Os caminhos de fluxo do produto são identificados e os principais elementos do layout foram reordenados, aprimorando o fluxo e reduzindo o estoque em processo, com alguns fornecedores entregando no ponto de uso quando apropriado.</p>	<p>Os produtos selecionados são produzidos usando um sistema de fluxo puxado diretamente pela demanda do cliente (take time), que inclui os principais fornecedores.</p>	<p>O trabalho é segmentado e organizado ao longo dos fluxos de valor para obter uma produção livre de defeitos sob demanda por meio da implementação de pull do cliente para os fornecedores de materiais.</p>
III.F. Distribuir produtos de maneira <i>Lean</i>	III.F.2. Distribuir produtos de maneira <i>Lean</i>	<ul style="list-style-type: none"> • A entrega no local de uso aos clientes com inspeção mínima de recebimento tornou-se uma prática padrão. • As entregas são sincronizadas para minimizar as mercadorias em trânsito e os requisitos de transporte. • O ciclo de entrega é mais curto e confiável. 	<p>Distribuir os estoques por lote, cliente e inspeciona os produtos no recebimento.</p>	<p>Distribuição de produtos a partir de baixos níveis de estoque é acionada por um sistema puxado interno, alguns produtos são entregues diretamente no ponto de uso com inspeção limitada.</p>	<p>Itens sem defeitos são produzidos e entregues sem inspeção de recebimento para uso do cliente em tempo real, os clientes têm acesso a bancos de dados para visibilidade do status do pedido.</p>	<p>A distribuição sob demanda livre de defeitos é alcançada por meio da implementação de pull do cliente desde o cliente final até os fornecedores de materiais.</p>
III.F. Distribuir e prestar serviço ao produto	III.F.3. Aumentar o valor dos produtos e serviços entregues aos clientes e à empresa	<ul style="list-style-type: none"> • Soluções para problemas de produto / serviço são coordenadas em toda a empresa para encontrar soluções rápidas e econômicas. • Os processos de suporte ao cliente e ao produto foram padronizados e são regularmente revisados em relação ao <i>feedback</i> do cliente. • As interrupções no fluxo de <i>design</i> e produção dos serviços de suporte foram minimizadas. 	<p>O sistema de suporte entrega produtos/serviços no prazo, mas com interrupções no fluxo de produção e recursos associados.</p>	<p>Os caminhos de fluxo do sistema de suporte são identificados e estão começando a ser integrados ao desenvolvimento de produtos enxutos e aos fluxos de produção.</p>	<p>Os processos padronizados de suporte ao cliente e ao produto fornecem informações responsáveis e fluxo de produto totalmente integrado aos fluxos de desenvolvimento e produção.</p>	<p>As necessidades dos clientes de produtos/serviços pós-entrega são antecipadas nos planos empresariais e atendidas pela adaptação e extensão das capacidades já fornecidas.</p>
	III.F.4. Fornecer serviço pós-entrega, suporte e sustentabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • O <i>feedback</i> do cliente é mantido de forma proativa e usado para prever quaisquer problemas de serviço emergentes e aprimorar projetos futuros. • Os níveis de peças sobressalentes são reduzidos de acordo com os prazos de entrega previsíveis curtos para peças sobressalentes. 	<p>Alto nível de peças sobressalentes necessário devido a taxas de falhas desconhecidas e longos prazos de reposição para reposição de peças sobressalentes.</p>	<p>A coleta de dados sobre tendências de falhas permite determinar pontos de intervalo de serviço para manutenção preventiva e reduzir os níveis de peças sobressalentes.</p>	<p>A empresa faz parte da solução de manutenção do cliente, garantindo a disponibilidade por meio da substituição de componentes críticos antes da falha.</p>	<p>A empresa tornou-se parte da solução de negócios do cliente por meio da garantia do desempenho do produto.</p>

Quadro 22: Práticas da LESAT para avaliação da maturidade do *Lean* (cont.)

Grupo Básico - Habilitando a Infraestrutura		Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Processos Empresariais	Práticas Lean	Indicadores Lean				
III.A. Habilitadores Organizacionais do Lean	<ul style="list-style-type: none"> O capital intelectual é considerado um ativo corporativo. Os funcionários têm planos de treinamento individuais, que estão alinhados aos requisitos de base de habilidades atuais e projetados. Os funcionários capturam e incorporam ativamente as lições aprendidas em treinamentos e práticas futuras. 	Os processos de recursos humanos concentram-se em recrutamento, colocação e benefícios. O treinamento de pessoal é ad hoc e não alinhado às necessidades organizacionais.	Um processo de desenvolvimento de pessoas bem definido, alinhado às necessidades organizacionais, é aplicado aos funcionários selecionados.	O processo de desenvolvimento de pessoal é estendido a todos os funcionários e incorpora as necessidades futuras previstas da empresa enxuta. Recursos e instalações são dedicados ao aprendizado.	Um clima de aprendizado é promovido dentro da empresa por meio do acesso imediato a informações e contribuições para a formulação de estratégias/políticas. Oportunidades para estender as experiências de aprendizagem são fornecidas.	Um clima de aprendizado é promovido em toda a empresa estendida pelo compartilhamento de capacidades, conhecimentos, habilidades e melhores práticas.
	<ul style="list-style-type: none"> Existem sistemas e ferramentas de informação compatíveis em toda a empresa. Os sistemas de informação facilitam a transferência e recuperação rápida e eficaz das informações necessárias. Os sistemas e ferramentas de informação complementam os processos e práticas Lean e são facilmente adaptados para acomodar as mudanças. 	A infra-estrutura de informação consiste principalmente em sistemas autônomos. A necessidade de integração de sistemas é reconhecida, mas não existe um plano de melhoria.	Os elementos de uma infra-estrutura de informação são determinados e um plano de implementação está em desenvolvimento. A manutenção de sistemas legados consome a maioria dos recursos de TI.	A infraestrutura de informação foi formalizada e está em uso em locais selecionados. Os sistemas legados são racionalizados e alinhados em todo o fluxo de valor.	Uma infra-estrutura de informações é implantada que oferece suporte à troca de informações contínua em toda a empresa.	Os sistemas de informação são totalmente interoperáveis e as informações pertinentes são facilmente acessíveis e utilizáveis em toda a empresa estendida.
	<ul style="list-style-type: none"> As questões de saúde e segurança são rotineiramente abordadas nas atividades de melhoria conduzidas pelos funcionários. Os processos e projetos são adaptados de forma proativa para minimizar os problemas ambientais, de saúde e segurança no negócio. Os projetos atendem às regulamentações ambientais atuais e são capazes de fácil adaptação para atender às mudanças projetadas ao longo do ciclo de vida do produto. 	A empresa cumpre todos os requisitos legais e regulamentares conhecidos e reage se forem identificados problemas.	São considerados meios de mitigar as condições que causam problemas ambientais, de saúde e segurança.	Um processo está em vigor para identificar proativamente os riscos de proteção ambiental, saúde e segurança (EHS) e gerenciá-los adequadamente, com preferência pela prevenção na fonte.	Soluções inovadoras para riscos potenciais de EHS no ciclo de vida são implementadas no início do projeto do produto (serviço) e em todo o fluxo de valor.	A prevenção e mitigação de riscos de EHS fazem parte da forma natural como os negócios são conduzidos em toda a empresa, criando um ambiente sustentável e criando uma vantagem competitiva.
III.B. Habilitadores de processo Lean	<ul style="list-style-type: none"> A força de trabalho desempenha um papel significativo na concepção de processos e práticas padrão, que são respeitados e atualizados periodicamente. As melhorias de processo são documentadas em um formato padrão conciso e fácil de usar e transferidas. Os processos são padronizados, quando aplicável, em toda a empresa. 	Os processos variam de acordo com o programa ou linha de produto.	Foram identificados processos-chave na organização que poderiam se beneficiar da padronização, com os esforços iniciais em andamento.	Os processos selecionados são padronizados em toda a empresa.	A padronização e a reutilização de processos são empregadas de forma consistente em toda a empresa.	Os processos de interface corporativa estendidos foram padronizados.
	<ul style="list-style-type: none"> A propriedade do processo e as exibições visuais da variação do processo permitem a identificação rápida e fácil de tendências adversas. Altos níveis de estabilidade do processo são mantidos utilizando técnicas à prova de erros e de identificação da causa raiz ao máximo. As reduções de variação alcançadas permitem prazos de entrega curtos e previsíveis para o fluxo de informações e materiais. 	Há um uso limitado de ferramentas e métodos de redução de variação. Há alguma evidência de compreensão de variação em partes da organização.	Há evidências de que as fontes de variação estão sendo identificadas e analisadas. Os esforços iniciais estão em andamento para reduzir a variabilidade.	Uma abordagem formal que equilibra o valor do cliente e a redução da variação é implementada em muitas partes da empresa.	Benefícios consideráveis são obtidos com a redução da variação nos processos e práticas em toda a empresa.	Os benefícios da variação reduzida são percebidos em toda a empresa estendida.

4.3. CICLO DE PROJETO

O ciclo de projeto é o terceiro e mais importante a ser executado, de acordo com o *Design Science Research*, além de ser o mais complexo. Como suporte a esse ciclo, utilizam-se as definições evidenciadas nos ciclos de relevância e rigor, seguindo as cinco etapas demonstradas no desenvolvimento da pesquisa (Figura 22) e tem o objetivo de construir o método que permita definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

4.3.1. ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO

A etapa de conscientização tem o intuito de estabelecer as variáveis do método, para priorizar e propor soluções, a fim de atender aos requisitos apresentados na Seção 4.1.3.

4.3.1.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

Como variáveis de entrada, foram identificadas 16 práticas *Lean*. A identificação dessas variáveis foi realizada a partir da análise dos 35 documentos selecionados na revisão sistemática da literatura, descrita na Seção 3.2.1.1. Os Quadros 20 e 21 (expostos nas páginas 102 e 103) apresentam as 16 práticas *Lean*, com os respectivos autores, ano e título dos documentos.

Como variáveis de saída, foram identificadas 24 tecnologias da Indústria 4.0. A identificação dessas variáveis foi realizada, também, a partir da análise dos 35 documentos selecionados na revisão sistemática da literatura, descrita na Seção 3.2.1.1. O Quadro 19 apresenta as 24 tecnologias da Indústria 4.0.

4.3.1.2 DEFINIÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

A relação entre as variáveis de entrada e de saída foi realizada, a partir da identificação da relação que os autores dos 35 documentos analisados

apresentaram em seus trabalhos. Os Quadros 20 e 21 apresentam a relação entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0, com os respectivos autores, ano e título dos documentos.

Para a análise dessa relação, será utilizada, como apoio, a técnica de análise de conteúdo proposta por Bardin (1979). Nessa técnica, a análise é realizada em três estágios: 1. Pré-análise; 2. Exploração do Material e 3. Tratamento, Inferência e Interpretação dos Resultados. A pré-análise visa organizar e sistematizar os materiais disponíveis para pesquisa. Nessa etapa, são selecionados os documentos, formuladas as hipóteses e desenvolvidos os indicadores que permitirão discutir os resultados. Durante a etapa de exploração do material, busca-se compreender o significado atribuído pelos envolvidos no estudo à pesquisa. Inclui contar ideias repetidas e listar situações que aparecem mais de uma vez ou mesmo aquelas que estão completamente ausentes. Por fim, a última etapa compreende o tratamento, inferência e interpretação dos resultados. Considera-se a chave do processo de pesquisa qualitativa por contemplar categorias de análise. Essas categorias reúnem o maior número possível de informações de diferentes fontes (observação, entrevista e questionário) e pretendem relacionar e organizar os fatos no que Bardin (1979) chama de categorização.

Dessa forma, pode-se observar que o VSM apresenta relações e benefícios com nove tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 23.

Quadro 23: Relações e benefícios entre o VSM e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre o VSM e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Verificações e Análises em Tempo Real	<p>Verificações e Análises em Tempo Real podem:</p> <ul style="list-style-type: none"> ► Aprimorar o VSM, por meio da coleta e análise de dados em tempo real, enfocando na logística da informação para detecção dos desperdícios nos fluxos de informação, dentro de uma empresa. • Auxiliar as empresas na implementação do VSM, criando automaticamente os mapas de fluxo de valor. • Automatizar a coleta de dados, reduzindo tanto o tempo investido nessa atividade, quanto a probabilidade de erros. • Aumenta a visibilidade das informações, fornecendo aos tomadores de decisão informações precisas e em tempo real do chão de fábrica. • Oferece possibilidades de redução de desperdício e um <i>feedback</i> imediato sobre as decisões, facilitando os experimentos em produção, por exemplo, relacionados a tamanhos de lote e sequenciamento de produção. • Possibilita que os dados de desempenho dos equipamentos e a localização dos objetos sejam coletados automaticamente, permitindo a atualização constante do VSM. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coleta e análise de dados em tempo real, enfocando na logística da informação para detecção dos desperdícios nos fluxos de informação. • Criação automática dos mapas de fluxo de valor. • Redução no tempo investido na coleta de dados e a probabilidade de erros. • Aumenta a visibilidade das informações, fornecendo aos tomadores de decisão informações precisas e em tempo real. • Possibilita a redução de desperdício e um <i>feedback</i> imediato sobre as decisões. • Permite uma atualização constante do VSM. 	Buer et al., 2018; Valamede e Akkari, 2020
Big Data	<ul style="list-style-type: none"> • A Big Data facilitaria a consolidação e análise das informações (dados) de todo o sistema produtivo, de forma automática e em tempo real, verificando padrões e interconexões do fluxo de valor, permitindo a utilização desses dados no mapeamento, análise e melhoria dos estados atual e futuro do VSM. • Além disso, por meio da Big Data, o VSM receberá continuamente novos dados e informações de toda a cadeia de suprimentos, agilizando o gerenciamento do fluxo de valor e a identificação de gargalos. Esse processo inteligente de gestão, permite que múltiplas possibilidades de mapeamento sejam estudadas e interpretadas pelos gestores, antes de serem colocadas em prática, o que contribui para a tomada de decisões. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidação e análise dos dados de todo o sistema produtivo, de forma automática e em tempo real, verificando padrões e interconexões do fluxo de valor, permitindo que esses dados sejam utilizados no mapeamento, análise e melhoria dos estados atual e futuro do VSM. • Maior agilidade no gerenciamento do fluxo de valor, possibilitando a identificação de gargalos. • Estudo e interpretação de múltiplas possibilidades de mapeamento, antes de serem colocadas em prática, contribuindo para a tomada de decisões. 	Mayr et al., 2018; Lugert et al., 2018; Valamede e Akkari, 2020; Marinelli et al., 2021; Saad et al., 2021
Aprendizagem de Máquina	<ul style="list-style-type: none"> • Após a implementação ou execução do VSM, pode-se introduzir a Aprendizagem de Máquina, com o intuito de oferecer suporte à criação dos próximos projetos de fluxo de valor. • Os estados futuros do VSM são gerados automaticamente e validados antes da implantação. Essa abordagem apoia um processo de melhoria contínua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolvimento e validação automáticos do VSM, a partir de tecnologias como aprendizagem de máquina, tornando o VSM mais ágil e dinâmico. 	Mayr et al., 2018
CPS	<ul style="list-style-type: none"> • Os CPS podem se beneficiar de uma implantação robusta do VSM, pois ambos têm alta abrangência em todo o fluxo de valor, sendo utilizados como uma tecnologia/prática de suporte, no desenvolvimento e expansão das operações. • Como uma aplicação adequada do VSM requer uma grande quantidade de informações, que quase sempre estão desatualizadas, ou não consideram a estocasticidade, prevê-se que a incorporação dos CPS pode fornecer dados mais precisos, para que as decisões gerenciais priorizem iniciativas de melhoria contínua, com base em cenários mais realistas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fornecimento de dados mais precisos, no desenvolvimento do VSM, permitindo que as decisões gerenciais priorizem iniciativas de melhoria contínua com base em cenários mais realistas. 	Pagliosa et al., 2021; Saad et al., 2021
IoT	<ul style="list-style-type: none"> • Quando se implementa a IoT onde se tem um VSM fortemente implantado, pode-se alcançar os seguintes resultados: ► O nível de precisão dos parâmetros do processo é primorado; ► Dados em tempo real. ► Redução ou eliminação da variação nos fluxos de produto, condições de processo e efeitos usuais baseados no tempo. ► Monitoração da sustentabilidade após a implantação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nível de precisão dos parâmetros do processo é primorado. • Dados em tempo real. • Redução ou eliminação da variação nos fluxos de produto, condições de processo e efeitos usuais baseados no tempo. • Monitoração da sustentabilidade após a implantação. 	Balaji et al., 2020
Autoidentificação / RFID	<ul style="list-style-type: none"> • A Autoidentificação atua na localização instantânea dos objetos, coletando e fornecendo dados em tempo real para o VSM, preenchendo a lacuna entre o fluxo físico de produtos, ou objetos e o fluxo de informações correspondente. • Os dados do sistema de execução de manufatura podem ser reunidos em tempo real, permitindo que o fluxo de valor corrente seja exibido permanentemente e gargalos, bem como melhorias, sejam apurados, continuamente. Assim, o VSM mudaria de uma ferramenta estática para uma dinâmica • A Autoidentificação permite que um VSM monitorado em tempo real faça o gerenciamento e rastreamento automático do fluxo de material, economizando tempo, reduzindo erros e tornando o VSM mais visível para os supervisores, a qualquer momento, permitindo tomadas de decisões mais precisas e em tempo real, no chão de fábrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Localização instantânea dos objetos. • Fornecimento de dados em tempo real para o mapeamento do fluxo de valor. • Transição do VSM de uma ferramenta estática para dinâmica. • Monitoramento do VSM em tempo real, permitindo o gerenciamento e rastreamento automático do fluxo de material, economizando tempo e reduzindo erros. • VSM mais visível para os supervisores, permitindo tomadas de decisões mais precisas e em tempo real no chão de fábrica. 	Ramadan et al., 2012; Mayr et al., 2018; Balaji et al., 2020; Lugert et al., 2018; Shahin et al., 2020
Computação em Nuvem	<ul style="list-style-type: none"> • A Computação em Nuvem receberia continuamente novos dados e informações de toda a cadeia de suprimentos, agilizando o gerenciamento do fluxo de valor e a identificação de gargalos. • Esse processo de gestão inteligente permite o estudo e a interpretação, pelos gestores, de múltiplas possibilidades de mapeamento, antes de serem colocadas em prática, contribuindo para a tomada de decisões. • Além disso, os recursos físicos do chão de fábrica são ligados a terminais de supervisão e controle, e mediante a utilização de <i>tablets</i>, <i>smartphones</i> e monitores, esse ambiente fornece informações remotamente para as partes interessadas, permitindo o acesso aos dados do fluxo de valor, bem como ao mapa atual, com futuras atividades de planejamento estratégico e controle de processos. 	<ul style="list-style-type: none"> • O VSM pode receber continuamente novos dados e informações de toda a cadeia de suprimentos, agilizando o gerenciamento do fluxo de valor e a identificação de gargalos. • Permite o estudo e interpretação, pelos gestores, de múltiplas possibilidades de mapeamento, antes de serem colocadas em prática, o que contribui para a tomada de decisões. • As informações podem ser transmitidas remotamente para as partes interessadas, permitindo o acesso aos dados do fluxo de valor, bem como ao mapa atual com futuras atividades de planejamento estratégico e controle de processos. 	Valamede e Akkari, 2020
Realidade Virtual	<ul style="list-style-type: none"> • A Realidade Virtual pode ser utilizada para criar VSMs virtuais, de modo que, ao invés do entendimento sobre as interações dos vários símbolos do VSM, os stakeholders podem estar imersos em um fluxo de valor virtual, observando em tempo real os modelos de estados atuais e futuros. 	<ul style="list-style-type: none"> • As partes interessadas podem fazer a imersão em um fluxo de valor virtual, observando em tempo real os modelos de estados atuais e futuros. 	Davies et al., 2017
Simulação	<ul style="list-style-type: none"> • Com a introdução da Simulação no VSM, é possível: ► Simular o estado futuro potencial do fluxo de valor e testá-lo, antes da implementação, uma vez que a análise convencional anterior desse fluxo tenha sido concluída. ► Usar a Simulação de eventos discretos para realizar um pré-teste das condições alvo do fluxo de valor e utilizar essa atividade como base para determinar automaticamente os benefícios monetários do estado futuro. ► Permitir que múltiplas possibilidades de mapeamento sejam estudadas e interpretadas pelos gestores, antes de serem colocadas em prática, contribuindo para a tomada de decisões, melhor treinamento aos trabalhadores e estudo da praticidade de cada opção de mapa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simular o estado futuro potencial do fluxo de valor permite testá-lo antes de sua implantação. • Realizar um pré-teste das condições alvo do fluxo de valor, determinando automaticamente os benefícios monetários do estado futuro. • Permite que os gestores estudem e interpretem múltiplas possibilidades de mapeamento, antes de serem colocadas em prática, contribuindo para a tomada de decisões, melhor treinamento aos trabalhadores e estudo da praticidade de cada opção de mapa desenvolvida. 	Lugert et al., 2018; Valamede e Akkari, 2020

Nota-se que, após a implementação ou execução do VSM, de forma robusta, pode-se introduzir a Aprendizagem de Máquina, com o intuito de oferecer suporte à criação dos próximos projetos de fluxo de valor. Dessa forma, os estados futuros são gerados automaticamente e validados antes da implementação. Além disso, essa abordagem apoia um processo de melhoria contínua (MAYR *et al.*, 2018).

Outra tecnologia que pode se beneficiar de um VSM implementado é a Autoidentificação, pois essa tecnologia atua na localização instantânea dos objetos, coletando e fornecendo dados em tempo real para o mapeamento do fluxo de valor, preenchendo, dessa forma, a lacuna entre o fluxo físico de produtos, ou objetos e o fluxo de informações correspondente (RAMADAN, *et al.*, 2012; MAYR *et al.*, 2018; BALAJI *et al.*, 2020). Assim, os dados do sistema de execução de manufatura podem ser reunidos em tempo real, fazendo com que o fluxo de valor corrente seja exibido permanentemente e gargalos, bem como melhorias, sejam apurados, continuamente. Dessa maneira, o VSM mudaria de uma ferramenta estática para uma dinâmica (LUGERT *et al.*, 2018). Observa-se ainda que a Autoidentificação permite que um VSM monitorado em tempo real faça o gerenciamento e rastreamento automático do fluxo de material. O sistema economiza tempo, reduz erros e torna o VSM mais visível para os supervisores, a qualquer momento, permitindo tomadas de decisões mais precisas e em tempo real, no chão de fábrica (SHAHIN *et al.*, 2020).

Mais um exemplo em que o VSM pode ser utilizado como filosofia de apoio é na utilização dos recursos da Big Data, pois essa tecnologia facilitaria a consolidação e análise das informações (dados) de todo o sistema produtivo, de forma automática e em tempo real, verificando padrões e interconexões do fluxo de valor, permitindo a utilização desses dados no mapeamento, análise e melhoria dos estados atual e futuro do VSM (MAYR *et al.*, 2018; LUGERT *et al.*, 2018). Além disso, por meio da Big Data, o VSM receberá continuamente novos dados e informações de toda a cadeia de suprimentos, agilizando o gerenciamento do fluxo de valor e a identificação de gargalos. Esse processo

inteligente de gestão, permite que múltiplas possibilidades de mapeamento sejam estudadas e interpretadas pelos gestores, antes de serem colocadas em prática, o que contribui para a tomada de decisões (VALAMEDE e AKKARI, 2020; SAAD *et al.*, 2021).

A Computação em Nuvem também pode se beneficiar das características do VSM, pois receberia continuamente novos dados e informações de toda a cadeia de suprimentos, agilizando o gerenciamento do fluxo de valor e a identificação de gargalos. Esse processo de gestão inteligente permite o estudo e a interpretação, pelos gestores, de múltiplas possibilidades de mapeamento, antes de serem colocadas em prática, contribuindo para a tomada de decisões. Além disso, os recursos físicos do chão de fábrica são ligados a terminais de supervisão e controle, e mediante a utilização de *tablets*, *smartphones* e monitores, esse ambiente fornece informações remotamente para as partes interessadas, permitindo o acesso aos dados do fluxo de valor, bem como ao mapa atual, com futuras atividades de planejamento estratégico e controle de processos (VALAMEDE e AKKARI, 2020).

Com relação aos CPS, verifica-se que essa tecnologia pode se beneficiar de uma implementação robusta do VSM, pois ambos têm alta abrangência em todo o fluxo de valor, sendo utilizados como uma tecnologia/prática de suporte, no desenvolvimento e expansão das operações. Como uma aplicação adequada do VSM requer uma grande quantidade de informações, que quase sempre estão desatualizadas, ou não consideram a estocasticidade, prevê-se que a incorporação dos CPS pode fornecer dados mais precisos, para que as decisões gerenciais priorizem iniciativas de melhoria contínua, com base em cenários mais realistas (PAGLIOSA *et al.*, 2021; SAAD *et al.*, 2021).

Referente a IoT, nota-se que os seguintes benefícios podem ser alcançados, quando se tem um VSM fortemente implementado (BALAJI *et al.*, 2020):

- Aprimoramento do nível de precisão do processo.
- Dados em tempo real.

- Redução ou eliminação da variação para os fluxos de produto, condições de processo e efeitos usuais baseados no tempo.
- Monitoração da sustentabilidade após a implementação.

Quando se tem um VSM implementado, observa-se que o conceito de Realidade Virtual pode ser estendido para criar VSMS virtuais. Assim, ao invés do entendimento sobre as interações dos vários símbolos do VSM, os *stakeholders* podem estar imersos em um fluxo de valor virtual, observando em tempo real os modelos de estados atuais e futuros (DAVIES *et al.*, 2017).

Já com a introdução da Simulação no VSM, é possível simular o estado futuro potencial do fluxo de valor e testá-lo, antes da implementação, uma vez que a análise convencional anterior desse fluxo tenha sido concluída. Além disso, é possível usar a Simulação de eventos discretos para realizar um pré-teste das condições alvo do fluxo de valor e, conseqüentemente, utilizar essa atividade como base para determinar automaticamente os benefícios monetários do estado futuro (LUGERT *et al.*, 2018). Observa-se também que as técnicas de Simulação permitem que múltiplas possibilidades de mapeamento sejam estudadas e interpretadas pelos gestores, antes de serem colocadas em prática, contribuindo para a tomada de decisões. Com diversas Simulações do VSM, os gestores podem fornecer melhor treinamento aos trabalhadores, bem como estudar a praticidade de cada opção de mapa (VALAMEDE e AKKARI, 2020).

Por fim, as Verificações e Análises em Tempo Real podem aprimorar ainda mais o VSM. O “*Value stream mapping 4.0*” enfoca a logística da informação e é uma ferramenta utilizada na detecção dos desperdícios nos fluxos de informação, dentro de uma empresa. Um VSM em tempo real pode auxiliar as empresas em sua implementação, criando automaticamente os mapas de fluxo de valor. Ao automatizar a coleta de dados, reduz-se tanto o tempo investido nessa atividade, quanto a probabilidade de erros. Além disso, é criada uma imagem dinâmica do chão de fábrica, aumentando a visibilidade das informações e fornecendo aos tomadores de decisão informações precisas e em tempo real. Esse modelo de VSM, oferece excelentes possibilidades de redução de desperdício, bem como

feedback imediato sobre as decisões. Isso facilita experimentos em produção, por exemplo, relacionados a tamanhos de lote e sequenciamento de produção (Buer *et al.*, 2018). Observa-se ainda que, por meio de sensores, atuadores e dispositivos de interação homem-computador, localizados em robôs, produtos e máquinas inteligentes, os dados de desempenho dos equipamentos e a localização dos objetos serão coletados automaticamente, permitindo a atualização constante do VSM 4.0 (VALEMEDE e AKKARI, 2020).

Já a prática do *Lean* Eliminação de Desperdícios, apresenta relações e benefícios com onze tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 24.

Quadro 24: Relações e benefícios entre o Eliminação de Desperdícios e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a Eliminação de Desperdícios e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Big Data	<ul style="list-style-type: none"> A integração da Big Data contribui para minimizar o desperdício no processo de criação de recursos digitais, como: visibilidade de dados (por exemplo, sistemas Andon de nova geração e painéis digitais), transparência de informações (por exemplo, monitoramento de produção em tempo real e sistemas de comunicação) e previsão de eventos críticos das operações conduzidas por humanos, máquinas e sistemas (por exemplo, gráficos de previsibilidade para melhoria contínua). Os recursos da Big Data são utilizados na identificação, em tempo real, de condições anormais no sistema produtivo e das causas raízes. A Big Data é aplicada em sistemas de manufatura, facilitando a previsão de falhas e evitando desperdícios como: espera, excesso de estoque (ou estoque de segurança), superprodução, defeitos e custos com transporte. 	<ul style="list-style-type: none"> Minimização do desperdício no processo de criação de recursos digitais, como por exemplo na visibilidade de dados (Andon Digital). Transparência de informações mediante ao monitoramento de produção em tempo real e sistemas de comunicação. Previsão de eventos críticos das operações conduzidas por humanos, máquinas e sistemas. Identificação, em tempo real, de condições anormais no sistema produtivo e das causas raízes. Facilidade na previsão de falhas, evitando desperdícios como: espera, excesso de estoque, superprodução, defeitos e custos com transporte. 	Romero et al., 2018; Rosin et al., 2019; Satoglu et al., 2017.
CPS	<ul style="list-style-type: none"> Com o apoio dos CPS pode-se, por exemplo, desenvolver um ambiente de produção sincronizado entre modelos virtuais e simulações, representando a fábrica virtual que ajudará a projetar, verificar e validar as operações de produção sem desperdícios no mundo cibernético, antes de seu lançamento nas operações físicas. Os recursos dos CPS, habilitados por meio de sensores e atuadores inteligentes, além de controladores adaptativos, permitem o controle inteligente de todos os processos de produção (evitando tempos de espera), possibilitando a autoadaptação (re-balanceamento) em tempo real, visando a flexibilidade máxima na gestão de flutuações excessivas de demanda e sobrecarga das capacidades das máquinas e dos operadores. Por meio dos CPS, todos os recursos de produção podem ser instrumentados e conectados em rede, apoiando uma programação de produção "verdadeiramente holística" ou reprogramação em tempo real, evitando desperdícios devido à falta de uma abordagem de (re)programação sistêmica. Os CPS oferecem ainda um controle preciso das atividades dentro e fora do chão de fábrica. Decisões melhores ou "mais inteligentes" podem ser tomadas no local (no nível do processo ou da máquina) para lidar com os muitos tipos diferentes de desperdícios, que prejudicam a eficiência. A capacidade de obter feedback imediato das partes interessadas (nos níveis vertical e horizontal) e um melhor controle individual de equipamentos podem ser a chave nos esforços para minimizar o tempo de espera da produção. 	<ul style="list-style-type: none"> Auxilia na projeção, verificação e validação das operações de produção, buscando a eliminação de desperdícios no mundo cibernético, antes de seu lançamento nas operações físicas. Permite o controle inteligente de todos os processos de produção, evitando o tempo de espera, possibilitando a autoadaptação (re-balanceamento) em tempo real, visando a flexibilidade máxima na gestão de flutuações excessivas de demanda e sobrecarga das capacidades das máquinas e dos operadores. Evita desperdícios relacionados à falta de uma abordagem de (re)programação sistêmica, mediante a instrumentação e conexão em rede, que apoiam uma (re)programação de produção "verdadeiramente holística", em tempo real. Realiza um controle preciso das atividades dentro e fora do chão de fábrica, em que decisões melhores ou "mais inteligentes" podem ser tomadas no local (no nível do processo ou da máquina) para lidar com os muitos tipos diferentes de desperdícios, que prejudicam a eficiência. 	Romero et al., 2018; LAI et al., 2019
IoT	<ul style="list-style-type: none"> Os recursos da IoT podem ser utilizados na análise das sequências/necessidades de uso do material, reduzindo ou eliminando o transporte desnecessário. A IoT permite ainda um aprimoramento e a integração entre os sistemas físicos, dentro de um sistema de manufatura, por meio de sensores e tecnologias de comunicação sem fio. Dessa forma, essa tecnologia melhora a percepção e a comunicação em uma base M2M (<i>Machine-to-Machine</i>) também a perspectiva referente à demanda e ao uso eficaz dos recursos, nos sistemas de manufatura. Assim, mediante o uso eficiente de equipamentos de fabricação e da própria mão de obra, pode-se reduzir os desperdícios de espera, processamento, movimento e estoque desnecessários, superprodução e defeitos. 	<ul style="list-style-type: none"> Redução ou eliminação do transporte desnecessário. Melhoria da percepção e da comunicação em uma base M2M (<i>Machine-to-Machine</i>), além da perspectiva referente à demanda e ao uso eficaz dos recursos, nos sistemas de manufatura. Redução de desperdícios como espera, processamento, movimentos e estoques desnecessários, superprodução e defeitos. 	Rosin et al., 2018; Satoglu et al., 2017
Manufatura Aditiva	<ul style="list-style-type: none"> Características da Manufatura Aditiva como a flexibilidade de projeto, tempo reduzido de configuração e ferramental, produtos leves e personalizados, proporcionam um menor desperdício de material, tornando-se eficaz para a produção em massa de estruturas de grande e pequena escala. A manufatura aditiva pode facilitar o projeto e a fabricação de produtos customizados, em condições adequadas de complexidade de projeto, customização e volume de produção. Conseqüentemente, pode reduzir o tempo de espera, o estoque, o processamento desnecessário, e os desperdícios de superprodução e peças/produtos defeituosos. 	<ul style="list-style-type: none"> Flexibilidade de projeto, tempo reduzido de configuração e ferramental, produtos leves e personalizados, proporcionando um menor desperdício de material. Facilita o projeto e a fabricação de produtos customizados, em condições adequadas de complexidade de projeto, customização e volume de produção, reduzindo o tempo de espera, o estoque, o processamento desnecessário, e os desperdícios de superprodução e peças/produtos defeituosos. 	Butt et al., 2020; Satoglu et al., 2017
AGV	<ul style="list-style-type: none"> Permite uma priorização na implantação dos AGVs em atividades sem valor agregado, como as tarefas de coleta, transporte e entrega de materiais na fábrica, possibilitando que os operadores continuem trabalhando em suas estações de trabalho e realizando atividades de valor agregado. 	<ul style="list-style-type: none"> Redução ou eliminação da mão de obra em atividades que não agregam valor. Utilização da mão de obra de maneira mais eficiente. 	Romero et al., 2018
Autoidentificação / RFID	<ul style="list-style-type: none"> A Autoidentificação pode, por exemplo, fornecer a capacidade de comparar automaticamente as características de todas as matérias-primas recebidas no armazém, com base nos dados do pedido de compra, a fim de controlar as discrepâncias que podem levar à manutenção de um estoque impreciso (ou incorreto), além da necessidade da contagem ou recontagem das unidades. A Autoidentificação ajuda a eliminar erros associados ao inventário, por meio do rastreamento em tempo real do material, de modo que um inventário livre de erros ajuda a manter um baixo nível de material e possibilita que os pedidos de mercadorias ocorram em tempo hábil. 	<ul style="list-style-type: none"> Controlar as discrepâncias que podem levar à manutenção de um estoque impreciso (ou incorreto), evitando a necessidade da contagem ou recontagem das unidades. Um status de inventário livre de erros ajuda a manter um baixo nível de material e possibilita que os pedidos de mercadorias ocorram em tempo hábil. 	Romero et al., 2018; Sanders et al., 2016
Computação em Nuvem	<ul style="list-style-type: none"> A computação em nuvem fornece dados em tempo real (e também acesso à dados históricos) das operações. Isso desencadeia uma evolução do sistema de gestão da qualidade, possibilitando "medições baseadas em amostragem" para uma "cobertura total" de operações. Nesse novo ambiente de fábrica, combinado com análise de dados em tempo real e controle avançado de processos, os sistemas de controle estatístico possibilitam a correção de erros em tempo real nas operações, minimizando o retrabalho e o refugo (desperdício), rumo a zero defeitos. A computação em nuvem melhora a percepção e a comunicação entre os processos, permitindo o uso eficaz dos recursos nos sistemas de manufatura. Assim, mediante ao uso eficiente desses recursos, desperdícios como espera, processamentos e movimentos desnecessários podem ser eliminados. 	<ul style="list-style-type: none"> Desencadeia uma evolução do sistema de gestão da qualidade, possibilitando "medições baseadas em amostragem" para uma "cobertura total" de operações. Facilita o projeto e a fabricação de produtos customizados, em condições adequadas de complexidade de projeto, customização e volume de produção, reduzindo o tempo de espera, o estoque, o processamento desnecessário, e os desperdícios de superprodução e peças/produtos defeituosos. Melhora a percepção e a comunicação entre os processos, permitindo o uso eficaz dos recursos nos sistemas de manufatura, eliminando desperdícios como espera, movimentos e processamentos desnecessários. 	Romero et al., 2018
Digital Twin	<ul style="list-style-type: none"> A <i>Digital Twin</i> pode ser utilizada para simular cenários, com o objetivo de resolver problemas de produção em uma "cópia virtual" de um sistema de produção. Isso permite que as ideias sejam testadas e que os gerentes escolham as mais promissoras. 	<ul style="list-style-type: none"> Por meio da simulação de cenários pode-se resolver problemas de produção em uma "cópia virtual" de um sistema de produção, permitindo que as ideias sejam testadas e que os gerentes escolham as mais promissoras. 	Rosin et al., 2019
Realidade Aumentada	<ul style="list-style-type: none"> A tecnologia Realidade Aumentada, na qual os objetos virtuais 3D são integrados em um ambiente real e em tempo real, pode ser empregada para visualização das instruções de trabalho operacionais e especificações de peças/produtos. Com base nessas características, a Realidade Aumentada pode auxiliar na eliminação de desperdícios como o transporte incorreto ou excessivo e defeitos nos materiais. 	<ul style="list-style-type: none"> Auxilia na eliminação de desperdícios como o transporte incorreto ou excessivo e defeitos nos materiais. 	Satoglu et al., 2017
Sensorização	<ul style="list-style-type: none"> Por meio do uso de sensores inteligentes é possível identificar e controlar a ocorrência de desperdícios como movimentos desnecessários de pessoas ou máquinas. Assim, o movimento desnecessário durante as operações e manutenção de equipamentos pode ser minimizado. Isso pode ser alcançado não apenas na fase operacional de produção, mas também na fase de projeto de futuras fábricas inteligentes. O mapeamento dos fluxos de valor do processo de produção se tornaria mais fácil e muito mais preciso, com um feedback em tempo real dos sensores e controladores em todos os equipamentos de manufatura, no chão de fábrica. Melhores sensores permitem um melhor monitoramento do processo de produção, permitindo que anomalias no processo sejam detectadas com bastante antecedência. Ademais, à medida que a comunicação M2M (<i>Machine-to-Machine</i>) é realizada, por meio de sensores, cada máquina detecta o estado de disponibilidade da máquina seguinte e decide iniciar ou parar a produção para não exceder a capacidade da área de <i>buffer</i>. Esse mecanismo basicamente reduz as quantidades de WIP (<i>Work-In-Process</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> Identificar e controlar a ocorrência de desperdícios, de forma que movimentos desnecessários, durante as operações e manutenção de equipamentos, sejam minimizados. Maior facilidade e precisão no mapeamento dos fluxos de valor, com um feedback em tempo real dos sensores e controladores em todos os equipamentos de manufatura. Melhor monitoramento do processo de produção, permitindo que anomalias no processo sejam detectadas com antecedência. Redução nas quantidades de WIP (<i>Work-In-Process</i>). 	LAI et al., 2019; Satoglu et al., 2017
Simulação	<ul style="list-style-type: none"> As simulações da fábrica virtual ajudarão a projetar, verificar e validar as operações de produção, sem desperdícios no mundo virtual, antes das introduções na fábrica real. A simulação é proposta para identificar as fontes de desperdícios. Uma cópia simulada de um sistema de produção pode desenvolver cenários para resolver problemas nas operações como um todo. Isso permite que as ideias sejam testadas e que os gerentes escolham as mais promissoras. O modelo de simulação das fábricas e processos de manufatura podem ser construídos em um ambiente virtual, para quantificar e observar os projetos de sistemas alternativos, obtendo a redução de desperdícios como o transporte, a espera, o processamento e produtos defeituosos. 	<ul style="list-style-type: none"> As simulações da fábrica virtual auxiliam na projeção, verificação e validação das operações de produção, sem desperdícios no mundo virtual, antes das introduções na fábrica real. Identificação das fontes de desperdícios. Testes de ideias para que os gerentes escolham as mais promissoras. Quantificação e observação dos projetos de sistemas alternativos. Redução de desperdícios como transporte, espera, processamento e produtos defeituosos. 	Rosin et al., 2019; Satoglu et al., 2017

Nota-se que, quando as empresas possuem a cultura de Eliminação de Desperdícios bem difundida, pode direcionar a implementação dos AGVs, primeiramente, em atividades sem valor agregado, como as tarefas de coleta, transporte e entrega de materiais na fábrica, permitindo que os operadores continuem trabalhando em suas estações de trabalho e realizando atividades de valor agregado (ROMERO *et al.*, 2018). Pode-se, então, alcançar benefícios, como a redução, ou eliminação da mão de obra em atividades que não agregam valor, utilizando-a, de forma mais eficiente.

Com base na cultura de Eliminação de Desperdícios, a implementação da tecnologia de Autoidentificação pode, por exemplo, fornecer a capacidade de comparar automaticamente as características de todas as matérias-primas recebidas no armazém, com base nos dados do pedido de compra, a fim de controlar as discrepâncias que podem levar à manutenção de um estoque impreciso (ou incorreto), além da necessidade da contagem ou recontagem das unidades (ROMERO *et al.*, 2018). Nota-se também que a autoidentificação ajuda a eliminar erros associados ao inventário, por meio do rastreamento em tempo real do material, de modo que um inventário livre de erros ajuda a manter um baixo nível de material e possibilita que os pedidos de mercadorias ocorram em tempo hábil (SANDERS *et al.*, 2016).

Já a Big Data, quando atua com base na Eliminação de Desperdícios, contribui para minimizar o desperdício no processo de criação de recursos digitais, como: visibilidade de dados (por exemplo, com sistemas Andon de nova geração e painéis digitais), transparência de informações (por exemplo, com o monitoramento de produção em tempo real e sistemas de comunicação) e previsão de eventos críticos das operações conduzidos por humanos, máquinas e sistemas (por exemplo, com a utilização de gráficos de previsibilidade para melhoria contínua) (ROMERO *et al.*, 2018). Observa-se, ainda, a utilização da Big Data para identificação, em tempo real, de condições anormais no sistema produtivo e das causas raízes (ROSIN *et al.*, 2019). Quando a Big Data é aplicada em sistemas de manufatura, espera-se que facilite a previsão de falhas, evitando desperdícios, como de espera, excesso de estoque (ou estoque de

segurança), superprodução, defeitos e custos com transporte (SATOGLU *et al.*, 2017).

No contexto da Eliminação de Desperdícios, a Computação em Nuvem auxilia no fornecimento de dados em tempo real (e também o acesso a dados históricos) das operações. Isso desencadeia uma evolução do sistema de gestão da qualidade, possibilitando “medições baseadas em amostragem” para uma “cobertura total” de operações. Nesse novo ambiente de fábrica, combinado com a análise de dados em tempo real e controle avançado de processos, os sistemas de controle estatístico possibilitam a correção de erros nas operações, em tempo real, minimizando o retrabalho e o refugo (desperdício), rumo a zero defeitos (ROMERO *et al.*, 2018). Verifica-se também que a Computação em Nuvem melhora a percepção e a comunicação entre os processos das operações, permitindo o uso eficaz dos recursos nos sistemas de manufatura, em que desperdícios como espera, processamento desnecessário e movimento podem ser eliminados (Satoglu *et al.*, 2017).

Os CPS, implementados com base na Eliminação de Desperdícios, terão como objetivo apoiar as operações de fábricas inteligentes, em direção a (quase) zero desperdícios físicos e digitais. Isso será alcançado, por exemplo, por um ambiente de produção sincronizado entre modelos virtuais e simulações, representando a fábrica virtual que ajudará a projetar, verificar e validar as operações de produção, sem desperdícios, no mundo cibernético, antes de seu lançamento nas operações físicas. Além disso, os recursos dos CPS, habilitados por meio de sensores e atuadores inteligentes, além de controladores adaptativos, permitem o controle inteligente de todos os processos de produção (evitando tempos de espera) e a autoadaptação (re-balanceamento) em tempo real, visando a flexibilidade máxima na gestão de flutuações excessivas de demanda e sobrecarga das capacidades das máquinas e dos operadores. Observa-se também que, por meio dos CPS, todos os recursos de produção podem ser instrumentados e conectados em rede, para apoiar uma programação de produção "verdadeiramente holística" ou reprogramação, em tempo real, evitando desperdícios, devido à falta de uma abordagem de (re)programação sistêmica (ROMERO, *et al.*, 2018). Os CPS oferecem ainda um controle preciso

das atividades, dentro e fora do chão de fábrica. Decisões melhores ou “mais inteligentes” podem ser tomadas no local (em nível do processo ou da máquina) para lidar com os muitos tipos diferentes de desperdícios, que prejudicam a eficiência. A capacidade de obter *feedback* imediato das partes interessadas (em níveis vertical e horizontal) e um melhor controle individual de equipamentos podem ser a chave nos esforços para minimizar o tempo de espera da produção (LAI *et al.*, 2019).

Apoiado pela Eliminação de Desperdícios, a *Digital Twin* pode ser utilizada para simular cenários, com o objetivo de resolver problemas de produção em uma “cópia virtual” de um sistema de produção. Isso permite que as ideias sejam testadas e que os gerentes escolham as mais promissoras (ROSIN *et al.*, 2019).

Já os recursos da IoT podem ser utilizados na análise das sequências/necessidades de uso do material, reduzindo, ou eliminando o transporte desnecessário (ROSIN *et al.*, 2019). A IoT permite ainda um aprimoramento e a integração entre os sistemas físicos, dentro de um sistema de manufatura, por meio de sensores e tecnologias de comunicação sem fio. Dessa forma, essa tecnologia melhora a percepção e a comunicação em uma base M2M (*Machine-to-Machine*) e a perspectiva referente à demanda e o uso eficaz dos recursos, nos sistemas de manufatura. Assim, mediante o uso eficiente de equipamentos de fabricação e da própria mão de obra, desperdícios como espera, processamentos, movimentos e estoques desnecessários, superprodução e defeitos podem ser reduzidos (SATOGLU *et al.*, 2017). Na Eliminação de Desperdícios, nota-se que características, como a flexibilidade de projeto, tempo reduzido de configuração e ferramental, produtos leves e personalizados, proporcionam um menor desperdício de material, tornando-se eficaz para a produção em massa de estruturas de grande e pequena escala (BUTT *et al.*, 2020). Assim, verifica-se que a Manufatura Aditiva, quando aplicada a esses conceitos, pode facilitar o projeto e a fabricação de produtos customizados, em condições adequadas de complexidade de projeto, customização e volume de produção. Consequentemente, pode reduzir desperdícios, como o tempo de espera, o estoque, o processamento desnecessário, a superprodução e as peças/produtos defeituosos (SATOGLU *et*

al., 2017). Já a tecnologia Realidade Aumentada, na qual os objetos virtuais 3D são integrados em um ambiente real e em tempo real, pode ser empregada para visualização das instruções de trabalho operacionais e especificações de peças/produtos. Com base nessas características, a Realidade Aumentada pode auxiliar na eliminação de desperdícios, como o transporte incorreto, ou excessivo e defeitos nos materiais (SATOGLU *et al.*, 2017).

Na Eliminação de Desperdícios, verifica-se que os movimentos desnecessários de pessoas ou máquinas contribuem para o desperdício de recursos na área de produção. Assim, por meio do uso de sensores inteligentes é possível identificar e controlar a ocorrência desses desperdícios. Dessa forma, o movimento desnecessário, durante as operações e manutenções de equipamentos pode ser minimizado. Isso pode ser alcançado não apenas na fase operacional de produção, mas também na fase de projeto de futuras fábricas inteligentes. O VSM do processo de produção se tornaria mais fácil e muito mais preciso com o *feedback* em tempo real dos sensores e controladores, em todos os equipamentos de manufatura, no chão de fábrica. Melhores sensores permitem um melhor monitoramento do processo de produção, permitindo que anomalias no processo sejam detectadas com bastante antecedência (LAI *et al.*, 2019). Ademais, à medida que a comunicação M2M (*Machine-to-Machine*) é realizada, por meio de sensores, cada máquina detecta o estado de disponibilidade da máquina seguinte e decide iniciar, ou parar a produção para não exceder a capacidade da área de *buffer*. Esse mecanismo basicamente reduz as quantidades de *WIP* (*Work-In-Process*) (SATOGLU *et al.*, 2017). As tecnologias utilizadas em Simulações, fundamentadas na Eliminação de Desperdícios, ajudarão a projetar, verificar e validar as operações de produção, no mundo virtual e sem desperdícios, antes das introduções na fábrica real (ROMERO *et al.*, 2018). Verifica-se também que a Simulação é proposta para identificar as fontes de desperdícios. Uma cópia simulada de um sistema de produção pode desenvolver cenários para resolver problemas nas operações como um todo. Isso permite que as ideias sejam testadas e que os gerentes escolham as mais promissoras (ROSIN *et al.*, 2019). Por fim, espera-se também que o modelo de Simulação das fábricas e processos de manufatura sejam construídos em um

ambiente virtual, para quantificar e observar os projetos de sistemas alternativos. Assim, por meio da Simulação, desperdícios, como o transporte, a espera, o processamento e os produtos defeituosos podem ser reduzidos (SATOGLU *et al.*, 2017).

A melhoria contínua, por sua vez, apresenta relações e benefícios com quatro tecnologias da Indústria 4.0 (Quadro 25).

Quadro 25: Relações/benefícios entre a Melhoria Contínua e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a Melhoria Contínua e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Big Data	<ul style="list-style-type: none"> Os dados capturados em tempo real são armazenados para análise posterior, mediante ao uso de métodos analíticos preditivos da Big Data, e são aplicados para avaliar o comportamento e o desempenho do sistema em ciclos de tempo apropriados, buscando a melhoria contínua. Os dados dos processos de produção e dispositivos inteligentes, bem como dos <i>stakeholders</i>, são coletados e compartilhados em um ambiente de computação em nuvem, com velocidade e variabilidade. Esses dados são posteriormente analisados pela Big Data, contribuindo para o alcance de resultados e soluções que proporcionam fluxo contínuo e, consequentemente, corroboram a filosofia da Melhoria Contínua. A interpretação desses dados possibilita o desenvolvimento de parâmetros de processos instáveis e evita problemas na qualidade da produção, contribuindo para a Melhoria Contínua. 	<ul style="list-style-type: none"> Desenvolvimento da melhoria contínua, por meio de métodos analíticos, com o apoio de dados em tempo real e dados históricos. A partir desses dados é possível buscar melhorias em processos instáveis, evitando, por exemplo, problemas de qualidade. 	Davies <i>et al.</i> , 2017; Valamede e Akkari, 2020; Marinelli <i>et al.</i> , 2021; Peças <i>et al.</i> , 2021
Aprendizagem de Máquina	<ul style="list-style-type: none"> A Aprendizagem de Máquina contribui para a filosofia de melhoria contínua, ao visar indicadores de desempenho específicos de processos complicados baseados em dados, escolhendo o melhor caminho de melhoria sob mudanças dinâmicas de produção. 	<ul style="list-style-type: none"> Com base nos dados, identifica-se o melhor caminho de melhoria sob mudanças dinâmicas de produção, por meio de indicadores de desempenho específicos de processos complexos. 	Saad <i>et al.</i> , 2021
Computação em Nuvem	<ul style="list-style-type: none"> Os dados dos processos de produção e dispositivos inteligentes, bem como das partes interessadas, são coletados e compartilhados em um ambiente de computação em nuvem com velocidade e variabilidade. Produtos, recursos e máquinas tornam-se artefatos inteligentes e conectados à internet global, mediante ao uso de tecnologias como sensores e atuadores, que interagem com o mundo físico e com os serviços da nuvem. Assim, os dados desses itens são coletados e armazenados, disponibilizando-os para uso em aplicações analíticas. A interpretação desses dados possibilita o desenvolvimento de parâmetros de processos e evita problemas na qualidade da produção, contribuindo para a melhoria contínua. 	<ul style="list-style-type: none"> Dados dos processos de produção e das partes interessadas podem ser coletados, armazenados e interpretados, possibilitando o desenvolvimento de parâmetros de processo em tempo real, evitando problemas na qualidade da produção e contribuindo para a melhoria contínua. 	Valamede e Akkari, 2020; Peças <i>et al.</i> , 2021
Simulação	<ul style="list-style-type: none"> A Simulação Virtual pode abranger as aplicações industriais como montagem, avaliação e visualização de projetos de produtos e o treinamento de colaboradores. A variabilidade dessas atividades se destaca como um potencial para a aplicação de melhorias significativas, por meio da utilização de processos convencionais de melhoria contínua (Kaizen). Dessa forma, as técnicas de simulação fazem com que as interrupções indesejadas na linha de produção possam ser reduzidas e as ideias de melhorias possam ser testadas antes de sua aplicação física real, permitindo também entender qual configuração permite reduzir desperdícios, como o consumo de material e fases de processamento, atendendo ao lema do <i>Lean</i> "fazer mais com menos". 	<ul style="list-style-type: none"> Permite que as interrupções indesejadas na linha de produção possam ser reduzidas e as ideias de melhorias possam ser testadas antes de sua aplicação física real. Permite entender qual configuração possibilita a redução de desperdícios, como o consumo de material e fases de processamento. 	Valamede e Akkari, 2020; Ciano <i>et al.</i> , 2021

Com base na cultura de Melhoria Contínua, identifica-se que os dados capturados em tempo real, podem ser armazenados para análise posterior, por métodos analíticos preditivos da Big Data, sendo aplicados para avaliar o comportamento e o desempenho do sistema em ciclos de tempo apropriados, buscando assim a melhoria contínua (DAVIES *et al.*, 2017; MARINELLI *et al.*, 2021). Além disso, os dados dos processos de produção e dispositivos inteligentes, bem como dos *stakeholders*, podem ser coletados e compartilhados, em um ambiente de computação em nuvem, com velocidade e variabilidade. Esses dados são posteriormente analisados pela Big Data,

contribuindo para o alcance de resultados e soluções que proporcionam fluxo contínuo e, conseqüentemente, corroboram a filosofia da Melhoria Contínua. A interpretação desses dados possibilita o desenvolvimento de parâmetros de processos instáveis e evita problemas na qualidade da produção, contribuindo para a Melhoria Contínua (VALAMEDE e AKKARI, 2020; PEÇAS *et al.*, 2021). Nota-se também que a Aprendizagem de Máquina contribui para a filosofia de Melhoria Contínua, ao visar indicadores de desempenho específicos de processos complicados baseados em dados, escolhendo o melhor caminho de melhoria sob mudanças dinâmicas de produção (SAAD *et al.*, 2021).

Com foco na Melhoria Contínua, observa-se que os dados dos processos de produção e de dispositivos inteligentes, bem como dos *stakeholders*, são coletados e compartilhados em um ambiente de Computação em Nuvem, com velocidade e variabilidade. Produtos, recursos e máquinas tornam-se artefatos inteligentes e conectados à internet global, mediante o uso de tecnologias, como sensores, atuadores que interagem com o mundo físico e com os serviços da nuvem. Assim, os dados desses itens são coletados, armazenados e disponibilizados para o uso em aplicações analíticas. A interpretação desses dados possibilita o desenvolvimento de parâmetros de processo instáveis e evita problemas na qualidade da produção, contribuindo para a melhoria contínua (VALAMEDE e AKKARI, 2020; PEÇAS *et al.*, 2021). Por fim, a Simulação Virtual fundamentada na Melhoria Contínua, pode abranger as aplicações industriais, como montagem, avaliação e visualização de projetos de produtos e treinamento de colaboradores. A variabilidade dessas atividades se destaca como um potencial para a aplicação de melhorias significativas, por meio da utilização de processos convencionais de melhoria contínua (Kaizen). Dessa forma, as técnicas de simulação fazem com que as interrupções indesejadas na produção possam ser reduzidas e as ideias de melhorias possam ser testadas, antes de sua aplicação física real, permitindo também entender qual configuração pode reduzir desperdícios, como o consumo de material e fases de processamento, atendendo ao lema do *Lean* "fazer mais com menos" (VALAMEDE e AKKARI 2020; CIANO *et al.*, 2021). O JIT/JIS e *Kanban*, por sua vez, apresenta relações e benefícios com quatorze tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 26.

Quadro 26: Relações e benefícios entre JIT/JIS/Kanban e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre o JIT/JIS/Kanban e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Big Data	<ul style="list-style-type: none"> Por meio da Big Data, realiza-se uma análise de informações detalhadas do processo produtivo, em tempo real, fornecendo <i>insights</i> sobre os parâmetros, ajudando na identificação de tendências e permitindo a dedução de regras para o sistema de produção, o que contribui para um melhor desempenho de toda a cadeia de suprimentos. Essa análise de dados permite ainda uma auto-organização do sistema de produção, possibilitando a redução dos níveis de estoque. A Big Data contribui ainda para o monitoramento em tempo real do fluxo de produção, automatizando o sistema logístico, mediante a um controle inteligente de estoque. Assim, a constante transformação de dados em informações de todo o fluxo de produção cria novos sistemas Kanban, capazes de apresentar múltiplas perspectivas de contextos produtivos, antecipando soluções e predizendo o comportamento da produção para a redução de gargalos. Com isso, tem-se um aumento da transparência dos movimentos do material, permitindo a combinação dos valores alvo e real para remover o estoque desnecessário. 	<ul style="list-style-type: none"> Auxilia na identificação de tendências e permite a dedução de regras para o sistema de produção, contribuindo para um melhor desempenho de toda a cadeia de suprimentos. Por meio da análise avançada de dados, tem-se uma auto-organização do sistema de produção, possibilitando a redução dos níveis de estoque. Permite o monitoramento em tempo real do fluxo de produção, automatizando o sistema logístico, mediante um controle inteligente de estoque. Novos sistemas Kanban, baseados em dados, são capazes de apresentar múltiplas perspectivas de contextos produtivos, antecipando soluções e reduzindo gargalos. Aumento da transparência dos movimentos do material, permitindo a combinação dos valores alvo e real para remover o estoque desnecessário. 	Mayr et al., 2018; Valamede e Akkari, 2020
Aprendizagem de Máquina	<ul style="list-style-type: none"> A Aprendizagem de Máquina simula e otimiza as quantidades de material nos contêineres do Kanban. 	<ul style="list-style-type: none"> Redução do estoque e melhorias na frequência de entrega. 	Laaper e Kiefer, 2020; Saad et al., 2021
CPS	<ul style="list-style-type: none"> O JIT, atuando com apoio dos CPS, torna-se uma ferramenta que oferece suporte a um processo enuto de fluxo de material, com o objetivo de equilibrar o estoque, baseando-se em dados ativos. Tem-se ainda que, ao invés de sinalizar os requisitos de material por meio de cartões, os contêineres do Kanban podem ser digitalizados mediante o uso dos CPS, aumentando a flexibilidade do sistema de abastecimento. Com a introdução dos CPS, objetiva-se, ainda, automatizar o conceito de Kanban, com uma interação humana limitada (ou inexistente). Assim, os contêineres de armazenamento inteligentes operam com base no princípio da autorregulação, o que contribui para a descentralização do processo de coleta e transferência de dados. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilita o equilibrar o estoque, com base em dados ativos. Kanban pode ser digitalizado, aumentando a flexibilidade do sistema de abastecimento. Os contêineres de armazenamento inteligentes operam com base no princípio da autorregulação, o que contribui para a descentralização do processo de coleta e transferência de dados. 	Wang et al., 2016; Wagner et al., 2017; Pekarcikova et al., 2020; Mannelli et al., 2021
IoT	<ul style="list-style-type: none"> Com a sua capacidade de monitoramento, pode realizar o rastreamento de produtos em tempo real e enviar dados sobre o progresso da produção aos gerentes. Além disso, a IoT pode ser usada para ajustar de forma independente a produção, de acordo com os produtos não acabados, aprimorando o princípio JIT. 	<ul style="list-style-type: none"> Rastreamento de produtos em tempo real, enviando dados sobre o progresso da produção aos gerentes. Ajuste independente da produção, de acordo com os produtos não acabados, aprimorando o princípio JIT. 	Sanders et al., 2016; Rosin et al., 2019; Saad et al., 2021
Manufatura Aditiva	<ul style="list-style-type: none"> A Manufatura Aditiva favorece a produção de lotes pequenos e customizados. Essa característica proporciona maior velocidade, versatilidade e adaptabilidade do sistema de produção, permitindo uma produção JIT. 	<ul style="list-style-type: none"> Favorece a produção de lotes pequenos e customizados, proporcionando maior velocidade, versatilidade e adaptabilidade do sistema de produção, permitindo uma produção JIT. 	Valamede e Akkari, 2020.
AGV	<ul style="list-style-type: none"> Os AGVs, são programados de acordo com os critérios desses princípios do Lean, transportando objetos automaticamente dentro do fluxo de material, por meio da utilização de contêineres (para a operacionalização do Kanban), minimizando os erros humanos e as "viagens vazias". O material é fornecido nas estações de trabalho de acordo com os requisitos de cada estação e no momento exato do consumo. Em caso de obstáculos, o sistema de transporte redireciona o AGV para um caminho alternativo. Com isso, observa-se que os AGVs são ajustados em tempo real, de acordo com as necessidades da linha de produção. Os AGVs permitem uma pré-montagem itinerante que reduz o ferramental e promove uma produção JIT. Nesse processo, o AGV visita todos os pontos da operação, de acordo com a rota identificada para um produto específico, e os trabalhadores adicionam componentes, conforme a sequência da atividade ou processo em andamento. 	<ul style="list-style-type: none"> Automatização do kanban, evitando "viagens vazias". Minimização de erros humanos nas atividades de transporte. Otimização no processo de entrega dos materiais, executando o abastecimento no momento exato ao uso. Ajuste dos AGVs em tempo real em caso de obstáculos ou alterações nas solicitações das linhas de montagem. Execução de pré-montagens durante o percurso dos AGVs, reduzindo a necessidade de ferramental e promovendo uma produção JIT. 	Mayr et al., 2018; Valamede e Akkari, 2020; Ciano et al., 2021
Autoidentificação / RFID	<ul style="list-style-type: none"> A Autoidentificação possibilita um monitoramento constante do trabalho em andamento, aumentando a transparência dos movimentos do material. Isso permite uma comparação entre os valores alvo e real, com o objetivo de remover o estoque desnecessário. Uma troca aprimorada de dados na produção resulta em um sistema de auto-organização. Assim, o nível de estoque pode ser reduzido ao mínimo. A Autoidentificação é aplicada no rastreamento e consumo de peças/materiais no nível da unidade, em tempo real, disparando as atividades de reposição de forma automática. Dispositivos e equipamentos são escaneados, possibilitando uma transmissão de sinal em tempo real, permitindo a visibilidade total de todos os processos que fazem parte do sistema Kanban. 	<ul style="list-style-type: none"> Transparência dos movimentos do material, permitindo uma comparação entre valores alvo e real, com o objetivo de remover o estoque desnecessário. Rastreamento e consumo de peças, em tempo real, disparando as atividades de reposição de forma automática. Visibilidade total de todos os processos que fazem parte do sistema Kanban, permitindo a otimização dos lotes. 	Mayr et al., 2018; Laaper e Kiefer, 2020; Pekarcikova et al., 2020; Anosike et al., 2021
Computação em Nuvem	<ul style="list-style-type: none"> A computação em nuvem permanece conectada com todos os colaboradores do chão de fábrica, enviando dados e informações, ajudando-os a solucionar problemas e tomar decisões melhores com rapidez, proporcionando o JIT. Tem-se também que, a computação em nuvem, possui diversos dispositivos de comunicação integrados, que gerenciam as informações sobre os produtos transportados. Uma vez que cada produto possui rastreamento <i>wireless</i> de sua origem, destino e status atual, essa tecnologia permite a entrega de itens no prazo, bem como otimiza rotas de transporte e confiabilidade logística, agregando valor aos clientes e tornando o JIT mais eficiente. A computação em nuvem pode também, disponibilizar, em tempo real, todas as informações relevantes ao sistema Kanban. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilita a solução de problemas e a tomada de decisões melhores com rapidez, proporcionando o JIT. Faz a gestão em tempo real dos produtos transportados ou em transporte. Permite a entrega de itens no prazo, bem como otimiza rotas de transporte e confiabilidade logística, agregando valor aos clientes, tornando o JIT mais eficiente. Disponibiliza em tempo real todas as informações relevantes ao sistema Kanban. 	Valamede e Akkari, 2020; Pekarcikova et al., 2020
Digital Twin	<ul style="list-style-type: none"> A <i>Digital Twin</i> pode simular e otimizar as quantidades e a sequência de entrega dos contêineres do Kanban. Observa-se ainda que, por meio de métodos de simulação ou uma representação virtual em tempo real de objetos físicos, novos <i>loops</i> do kanban podem ser planejados com mais previsão e perfeitamente integrados ao ambiente de produção existente. 	<ul style="list-style-type: none"> Simulação e otimização das quantidades e a sequência de entrega dos contêineres do Kanban. Novos <i>loops</i> do kanban podem ser planejados com mais previsão e perfeitamente integrados ao ambiente de produção existente. 	Mayr et al., 2018
Dispositivos Móveis / Eletrônicos	<ul style="list-style-type: none"> Os princípios básicos do Kanban são aprimorados, por meio da utilização de dispositivos móveis, em que o modelo de cartão para a indicação de reabastecimento é substituído por <i>pick-to-light</i>, visualizada via <i>smartphones</i> ou <i>tablets</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> O Kanban é aprimorado, por meio da utilização de dispositivos móveis, em que o modelo de cartão para a indicação de reabastecimento é substituído por <i>pick-to-light</i>, visualizado via <i>smartphones</i> ou <i>tablets</i>. 	Ciano et al., 2021
Embalagens Inteligentes	<ul style="list-style-type: none"> As embalagens inteligentes buscam a auto otimização, pois atuando de forma autônoma, podem detectar o seu próprio nível de estoque e solicitar peças automaticamente de fornecedores, auxiliando na redução dos níveis de inventário. Observa-se ainda que, mediante a utilização de um sistema óptico de pedidos e câmeras que detectam o nível de estoque (como uma extensão dos contêineres do Kanban), pode-se enviar pedidos automaticamente aos fornecedores, resultando na redução do estoque intermediário, possibilitando que as peças de reposição sejam programadas de acordo com o pedido, aumentando a flexibilidade do sistema de abastecimento. 	<ul style="list-style-type: none"> Redução dos níveis de inventário. Redução do estoque intermediário, possibilitando que as peças de reposição sejam programadas de acordo com o pedido, aumentando a flexibilidade do sistema de abastecimento. 	Mayr et al., 2018; Buer et al., 2018; Kolberg e Zühke, 2015; Pekarcikova et al., 2020
Memória Digital de Objetos	<ul style="list-style-type: none"> Uma memória digital de objetos pode auxiliar no JIT, pois armazena todos os parâmetros de fabricação necessários e, combinada com o monitoramento da condição das mercadorias transportadas, pode ser utilizada como um auxílio para uma navegação eficiente dos AGVs. Essa auto-organização auxilia ainda na construção de redes de logística robustas para a produção JIT. 	<ul style="list-style-type: none"> Auxílio para uma navegação eficiente dos AGVs. Auxilia na construção de redes de logística robustas para a produção JIT. 	Mayr et al., 2018
Robotização	<ul style="list-style-type: none"> Com relação ao JIT/JIS e Kanban, os robôs podem fazer ajustes na produção, de forma autônoma. Além disso, esses robôs podem responder em tempo real a qualquer verificação ou alteração na produção, garantindo que ela ocorra sem problemas. Tem-se ainda que, robôs ou cobots colaborativos podem ajudar os operadores em seu trabalho e se beneficiar de um certo nível de autonomia, para reagir às ações dos operadores. Verifica-se também que, os robôs autônomos podem ajustar o planejamento da produção em tempo real, garantindo um fluxo contínuo e permitindo que todos os sistemas se ajustem a esse planejamento, de forma autônoma. 	<ul style="list-style-type: none"> Robôs fazem ajustes na produção, de forma autônoma. Robôs respondem em tempo real a qualquer verificação ou alteração na produção, garantindo que a mesma ocorra sem problemas. Robôs ou cobots colaborativos ajudam os operadores em seu trabalho e se beneficiam de um certo nível de autonomia, para reagir às ações dos operadores. Robôs autônomos ajustam o planejamento da produção em tempo real, garantindo um fluxo contínuo e permitindo que os sistemas se ajustem ao planejamento de produção de forma autônoma. 	Rosin et al., 2019
Simulação	<ul style="list-style-type: none"> A Simulação permite apresentar múltiplas perspectivas de contextos produtivos, antecipando soluções e prevendo o comportamento da produção para redução de gargalos. A simulação pode ser utilizada para garantir um fluxo contínuo, especialmente na detecção de gargalos. Além disso, a simulação pode ser aplicada no teste de diferentes cenários de resposta a interrupções no fluxo de produção, em tempo real, permitindo aos gerentes identificar as alterações necessárias, mediante a seleção desses cenários. A simulação também é proposta para simular mudanças nos kanbans, testando diferentes parâmetros, com o objetivo de encontrar parâmetros ideais, como tamanho do lote, estoque mínimo e frequência de entrega. Além disso, a simulação capacita o JIT, pois permite testar e otimizar as rotas do AGV. A capacidade de simulação para detectar gargalos garante ainda o fluxo contínuo JIT. Dessa maneira, pode-se configurar o <i>layout</i> de forma a capacitar o fluxo do processo (e em alguns casos, o fluxo do processo a capacitar é um <i>One-Piece-Flow</i>). Especificamente sobre o Kanban, nota-se que os métodos de simulação simulam novos <i>loops</i> do kanban, podendo planejá-los com maior acuracidade e integrá-los ao ambiente de produção existente. A simulação garante ainda a identificação dos parâmetros kanban ideais, como tamanho do lote, estoque ou frequência de entrega. Além disso, alterações externas podem ser incluídas enquanto o sistema atualiza os parâmetros de forma autônoma. 	<ul style="list-style-type: none"> Permite apresentar múltiplas perspectivas de contextos produtivos, antecipando soluções e prevendo o comportamento da produção para a detecção e redução de gargalos. Testa diferentes cenários de resposta a interrupções no fluxo de produção em tempo real, permitindo aos gerentes aplicar as alterações necessárias, mediante a seleção desses cenários. Simula mudanças nos kanbans, testando diferentes parâmetros, com o objetivo de encontrar parâmetros ideais, como tamanho do lote, estoque mínimo e frequência de entrega. Capacita o JIT, pois permite testar e otimizar as rotas do AGV. A capacidade de simulação para detectar gargalos garante o fluxo contínuo JIT. Permite configurar o <i>layout</i> de forma a capacitar o fluxo do processo. Simula novos <i>loops</i> do kanban, podendo planejá-los com maior acuracidade e integrá-los ao ambiente de produção existente. Garante a identificação dos parâmetros kanban ideais, como tamanho do lote, estoque ou frequência de entrega. Possibilita a inclusão de alterações externas, enquanto o sistema atualiza os parâmetros de forma autônoma. 	Valamede e Akkari, 2020; Rosin et al., 2019; Ciano et al., 2021; Mayr et al., 2018; Laaper e Kiefer, 2020

Verifica-se, por exemplo, que os AGVs podem ser programados de acordo com os critérios do JIT/JIS e *Kanban*, transportando objetos automaticamente dentro do fluxo de material, por meio da utilização de contêineres (para a operacionalização do *Kanban*), minimizando os erros humanos e as "viagens vazias". Além disso, o material é fornecido nas estações de trabalho, de acordo com os requisitos de cada estação e no momento exato do consumo. Em caso de obstáculos, o sistema de transporte redireciona o AGV para um caminho alternativo, além de ajustá-los em tempo real, de acordo com as necessidades da linha de produção. Observa-se, ainda, que os AGVs permitem uma pré-montagem itinerante, reduzindo o ferramental e promovendo uma produção JIT. Nesse processo, o AGV visita todos os pontos da operação, de acordo com a rota identificada para um produto específico, e os trabalhadores adicionam a cada vez um componente sequencial ao trabalho em andamento. A partir dessas ações, espera-se como benefícios a automatização do *Kanban*, a minimização de erros humanos, a otimização do processo de entrega de materiais, os ajustes dos AGVs em tempo real e a redução de ferramental (MAYR *et al.*, 2018; VALAMEDE e AKKARI, 2020; CIANO *et al.*, 2021).

Já a Aprendizagem de Máquina pode simular e otimizar as quantidades de material nos contêineres, reduzindo o estoque e melhorando a frequência de entrega, conforme os objetivos do JIT/JIS e *Kanban* (LAAPER e KIEFER, 2020; SAAD *et al.*, 2021).

A Autoidentificação, apoiada pelo JIT/JIS e *Kanban*, possibilita um monitoramento constante do trabalho em andamento e, conseqüentemente, a transparência dos movimentos do material é aumentada. Isso permite uma comparação entre os valores alvo e real, com o objetivo de remover o estoque desnecessário. Além disso, uma troca aprimorada de dados na produção resulta em um sistema de auto-organização. Assim, o nível de estoque pode ser reduzido ao mínimo (MAYR *et al.*, 2018; ANOSIKE *et al.*, 2021). Outro benefício está na possibilidade de aplicar essa tecnologia no rastreamento e consumo de peças/materiais em nível da unidade, em tempo real, disparando a atividade de reposição, automaticamente. É possível também escanear dispositivos com

transmissão de sinal em tempo real, permitindo a visibilidade total de todos os processos que fazem parte do sistema *Kanban* (LAAPER e KIEFER, 2020; PEKARCIKOVA *et al.*, 2020).

A aplicação da Big Data, fundamentada no JIT/JIS e *kanban*, pode habilitar a análise de informações detalhadas do processo, em tempo real, fornecendo *insights* sobre os parâmetros, ajudando na identificação de tendências e permitindo a dedução de regras para o sistema de produção, o que contribui para melhor desempenho de toda a cadeia de suprimentos. Essa análise de dados permite ainda uma auto-organização do sistema de produção, possibilitando a redução dos níveis de estoque. A Big Data contribui ainda para o monitoramento, em tempo real do fluxo de produção, automatizando o sistema logístico, por meio de um controle inteligente de estoque. Assim, a constante transformação de dados em informações de todo o fluxo de produção, cria novos sistemas *Kanban*, capazes de apresentar múltiplas perspectivas de contextos produtivos, antecipando soluções e predizendo o comportamento da produção para a redução de gargalos. Com isso, tem-se um aumento da transparência dos movimentos do material e do processo, permitindo a comparação entre valores alvo e real para remover o estoque desnecessário. (MAYR *et al.*, 2018; VALAMEDE e AKKARI, 2020).

A Computação em Nuvem, por sua vez, permanece conectada com todos os colaboradores do chão de fábrica, enviando dados e informações, ajudando-os a solucionar problemas e tomar decisões melhores, com rapidez, proporcionando o JIT. Tem-se também que a Computação em Nuvem possui diversos dispositivos de comunicação integrados, que gerenciam as informações sobre os produtos transportados. Uma vez que cada produto possui rastreamento *wireless* de sua origem, destino e status atual, essa tecnologia permite a entrega de itens no prazo, otimiza rotas de transporte e aumenta a confiabilidade logística, agregando valor aos clientes e tornando o JIT mais eficiente (VALAMEDE e AKKARI, 2020). Nota-se ainda que a Computação em Nuvem disponibiliza, em tempo real, todas as informações relevantes ao sistema *Kanban* (PEKARCIKOVA *et al.*, 2020).

No contexto dos CPS, o JIT/JIS e *Kanban* oferece suporte a um processo enxuto de fluxo de material, com o objetivo de equilibrar o estoque, baseando-se em dados ativos (WANG *et al.*, 2016; Wagner *et al.*, 2017). Tem-se ainda que, ao invés de sinalizar os requisitos de material por meio de cartões, os contêineres do *Kanban* podem ser digitalizados com o uso dos CPS, aumentando a flexibilidade do sistema de abastecimento. Mediante a introdução dos CPS, objetiva-se automatizar o conceito de *Kanban*, com uma interação humana limitada (ou inexistente). Assim, os contêineres de armazenamento inteligentes operam com base no princípio da autorregulação, o que contribui para a descentralização do processo de coleta e transferência de dados (PEKARCIKOVA *et al.*, 2020; MARINELLI, 2021).

A *Digital Twin*, com base no JIT/JIS e *Kanban*, pode simular e otimizar as quantidades e a sequência de entrega dos contêineres do *Kanban*. Observa-se ainda que, por meio de métodos de simulação, ou uma representação virtual, em tempo real, de objetos físicos, novos *loops* do *kanban* podem ser planejados com mais precisão e perfeitamente integrados ao ambiente de produção existente (MAYR *et al.*, 2018).

Os dispositivos móveis, fundamentados nos princípios básicos do *Kanban*, são aplicados nas operações, de maneira que o modelo de cartão para a indicação de reabastecimento é substituído pelo *pick-to-light*, visualizado via *smartphones* ou *tablets* (CIANO *et al.*, 2021).

As embalagens inteligentes (atuando no contexto de objetos inteligentes) são tecnologias da Indústria 4.0 que também apresentam relações com o JIT/JIS e *Kanban*. Nesse contexto, as embalagens inteligentes buscam a auto-otimização, pois, atuando de forma autônoma, podem detectar o seu próprio nível de estoque e solicitar peças automaticamente de fornecedores, auxiliando na redução dos níveis de inventário. Observa-se, ainda, que, por meio da utilização de um sistema óptico de pedidos e câmeras que detectam o nível de estoque (como uma extensão dos contêineres do *Kanban*), podem-se enviar pedidos automaticamente aos fornecedores, resultando na redução do estoque intermediário, possibilitando que as peças de reposição sejam programadas, de

acordo com o pedido, aumentando a flexibilidade do sistema de abastecimento (MAYR *et al.*, 2018; BUER *et al.*, 2018; KOLBERG e ZÜHLKE, 2015; PEKARCIKOVA *et al.* 2020).

Já a IoT, com a sua capacidade de monitoramento, pode realizar o rastreamento de produtos, em tempo real, e enviar dados sobre o progresso da produção aos gerentes. Além disso, a IoT pode ser usada para ajustar a produção, de forma independente, de acordo com os produtos em processo, aprimorando o JIT (SANDERS *et al.*, 2016; ROSIN *et al.*, 2019; SAAD *et al.*, 2021).

A Manufatura Aditiva, por sua vez, favorece a produção de lotes pequenos e customizados. Essa característica proporciona maior velocidade, versatilidade e adaptabilidade do sistema de produção, permitindo uma produção JIT (VALAMEDE e AKKARI, 2020).

A Memória Digital de Objetos pode trazer melhorias no JIT/JIS e *Kanban*, pois armazena todos os parâmetros de fabricação necessários e, combinada com o monitoramento da condição das mercadorias transportadas, pode ser utilizada como um auxílio para uma navegação eficiente dos AGVs. Essa auto-organização auxilia ainda na construção de redes de logística robustas para a produção JIT (MAYR *et al.*, 2018).

Identifica-se também que a tecnologia Robotização (ou utilização de robôs autônomos) apresenta relações com o JIT/JIS e *Kanban*, permitindo que os robôs façam ajustes na produção, de forma autônoma. Além disso, esses robôs podem responder em tempo real a qualquer verificação, ou alteração na produção, garantindo que elas ocorram sem problemas. Tem-se ainda que robôs, ou *cobots* colaborativos podem ajudar os operadores em seu trabalho e se beneficiar de certo nível de autonomia para reagir às ações dos operadores. Verifica-se também que os robôs autônomos podem ajustar o planejamento da produção em tempo real, garantindo um fluxo contínuo e permitindo que todos os sistemas se ajustem a esse planejamento, de forma autônoma (ROSIN *et al.*, 2019).

Por fim, a Simulação, apoiada pelo JIT/JIS e *Kanban*, permite apresentar múltiplas perspectivas de contextos produtivos, antecipando soluções e prevendo o comportamento da produção para redução de gargalos (VALAMEDE e AKKARI, 2020). Espera-se ainda que a Simulação também possa ser utilizada para garantir um fluxo contínuo, especialmente na detecção de gargalos. Além disso, a Simulação pode ser utilizada no teste de diferentes cenários de resposta a interrupções no fluxo de produção, em tempo real, permitindo aos gerentes aplicar as alterações necessárias, mediante a seleção desses cenários. Verifica-se que a Simulação também é proposta para simular mudanças nos *kanbans*, testando diferentes parâmetros e encontrando parâmetros ideais, como tamanho do lote, estoque mínimo e frequência de entrega (ROSIN *et al.*, 2019). Tem-se ainda que a Simulação capacita o JIT, pois permite testar e otimizar as rotas do AGV. A capacidade de simulação para detectar gargalos garante ainda o fluxo contínuo JIT. Dessa maneira, a Simulação permite configurar o *layout*, de forma a capacitar o fluxo do processo (e, em alguns casos, o fluxo do processo a capacitar é um *One-Piece-Flow*) (CIANO *et al.*, 2021). Especificamente sobre o *Kanban*, nota-se que os métodos de simulação (ou uma representação virtual em tempo real de objetos físicos) simulam novos *loops* do *kanban*, podendo planejá-los com maior acuracidade na previsão e perfeitamente integrados ao ambiente de produção existente. A Simulação garante ainda a identificação dos parâmetros *kanban* ideais, como tamanho do lote, estoque ou frequência de entrega. Além disso, alterações externas podem ser incluídas, enquanto o sistema atualiza os parâmetros de forma autônoma (MAYR *et al.*, 2018; LAAPER e KIEFER, 2020; CIANO *et al.*, 2021).

Já a prática de Gestão à Vista, apresenta relações e benefícios com seis tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 27.

Quadro 27: Relações e benefícios entre Gestão à Vista e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a Gestão à Vista e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Big Data	<ul style="list-style-type: none"> • Big Data pode ser usado para extrair e processar os dados das ferramentas de gestão à vista, para convertê-los em informações para os gerentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestão dos dados para tomada de decisão. 	Salvadorinho e Teixeira, 2021
IoT	<ul style="list-style-type: none"> • A IoT também pode ser usada na integração de máquinas no chão de fábrica e também para conectar as máquinas com sistemas Andon, aprimorando o sistema de suporte à decisão para melhoria de processos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aprimoramento do sistema de suporte à decisão para melhoria de processos, por meio da integração de máquinas, conectando-as com os sistemas Andon. 	Saad et al., 2021; Salvadorinho e Teixeira, 2021
Autoidentificação / RFID	<ul style="list-style-type: none"> • A Autoidentificação auxilia na execução do 5S com mais eficiência, garantindo, por exemplo, a identificação e localização dos objetos, reduzindo o tempo de busca. • As etiquetas RFID armazenam instruções sobre como limpar ferramentas e objetos de forma adequada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Execução mais eficiente do 5S, garantindo a identificação e localização dos objetos, reduzindo o tempo de busca. • Instruções para preservação do ferromental, aumentado sua vida útil. 	Mayr et al., 2018
Dispositivos Móveis / Eletrônicos	<ul style="list-style-type: none"> • O sistema Andon é implantado, porém ao invés de monitores são utilizados <i>smartphones</i>, <i>tablets</i> e relógios inteligentes, em que as notificações são direcionadas tanto para os operadores quando para os gerentes, em tempo real e com atualizações constantes dos dados, isso reduz o tempo entre a ocorrência da falha e a notificação das pessoas envolvidas. • Outro ponto importante, refere-se às máquinas inteligentes que podem detectar anomalias no processo, com a utilização de sensores ou câmeras, e solicitar reparos por meio de <i>smartphones</i>, <i>smartwatches</i> ou <i>tablets</i>, seguindo o princípio do Andon. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de <i>smartphones</i>, <i>tablets</i> e relógios inteligentes para notificações em tempo real dos operadores e gerentes, reduzindo o tempo entre a ocorrência da falha e a notificação das pessoas envolvidas. • Detecção de anomalias no processo, com a utilização de sensores ou câmeras, possibilitando a solicitação de reparos por meio de <i>smartphones</i>, <i>smartwatches</i> ou <i>tablets</i>. 	Mayr, et al., 2018; Kolberg e Zühke, 2015; Ciano et al., 2021
Interação Homem-Computador	<ul style="list-style-type: none"> • Ao implantar essa tecnologia é possível receber informações em tempo real (independentemente da distância entre o operador e a máquina ou atividade), acionar ações e processos de controle, por meio de <i>tablets</i> e <i>smartphones</i>, de modo que as informações se tornem remotamente disponíveis e recuperáveis para todos os envolvidos na operação. 	<ul style="list-style-type: none"> • As informações são disponibilizadas em tempo real, acionando ações e processos de controle, por meio de <i>tablets</i> e <i>smartphones</i>, de modo que essas informações se tornem remotamente disponíveis e recuperáveis para todos os envolvidos na operação. 	Mayr et al., 2018
Realidade Aumentada	<ul style="list-style-type: none"> • A Realidade Aumentada pode ajudar a realizar o 5S com mais eficiência. A aplicação dessa tecnologia pode, por exemplo, substituir os <i>shadow boards</i> físicos, pois os elementos virtuais orientam os operadores sobre onde colocar as ferramentas. • Além disso, a integração da gamificação, por meio da Realidade Aumentada, pode motivar os operadores, atribuindo créditos por limpezas realizadas ou posicionamento correto das ferramentas. • Observa-se ainda que a Realidade Aumentada facilita o uso de <i>mock-up</i> digital industrial, no que se refere à exibição de informações do processo em formato visual, facilitando sua interação, possibilitando que os operadores tenham um <i>feedback</i> visual em caso de falhas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Auxilia na realização de um 5S mais eficiente. • Motiva os operadores, atribuindo créditos por limpezas realizadas ou posicionamento correto das ferramentas. • Possibilita a exibição de informações do processo em formato visual, facilitando sua interação, permitindo que os operadores tenham um <i>feedback</i> visual em caso de falhas. 	Mayr, et al., 2018; Shahin et al., 2020; Rosin et al., 2019; Salvadorinho e Teixeira, 2021

Com base na Gestão à Vista, pode-se utilizar a Autoidentificação para ajudar na execução do 5S com mais eficiência. O RFID, por exemplo, garante a identificação e localização dos objetos, reduzindo o tempo de busca. Além disso, as etiquetas RFID podem armazenar instruções sobre a forma adequada de limpar ferramentas e objetos. A IoT, por sua vez, com o apoio do princípio de Gestão à Vista, pode ser usada na integração de máquinas no chão de fábrica e também para conectar as máquinas com sistemas *Andon*, aprimorando o sistema de suporte à decisão para melhoria de processos (SAAD *et al.*, 2021; SALVADORINHO e TEIXEIRA, 2021). Contata-se também que a Big Data pode ser utilizada para extrair e processar os dados das ferramentas de gestão à vista, para convertê-los em informações para os gerentes, auxiliando-os na tomada de decisão (SALVADORINHO e TEIXEIRA, 2021).

Já na utilização de técnicas de Gestão à Vista, como o sistema *Andon*, observa-se que, ao invés de monitores, são utilizados *smartphones*, *tablets* e relógios inteligentes, em que as notificações são direcionadas tanto para os operadores quando para os gerentes, em tempo real e com atualizações constantes dos dados. Isso permite reduzir o tempo entre a ocorrência da falha e a notificação das pessoas envolvidas (MAYR, *et al.*, 2018; KOLBERG e ZÜHLKE, 2015).

Outro ponto importante, refere-se às máquinas inteligentes que podem detectar anomalias no processo, com a utilização de sensores ou câmeras, e solicitar reparos, por meio de *smartphones*, *smartwatches* ou *tablets*, também seguindo o princípio do *Andon* (CIANO *et al.*, 2021). A tecnologia conhecida como Interação Homem-Computador apresenta relações com a prática Gestão à Vista. Ao implementar essa tecnologia é possível receber informações em tempo real (independentemente da distância entre o operador e a máquina ou atividade), acionar ações e processos de controle por meio de *tablets* e *smartphones*, de modo que as informações se tornem remotamente disponíveis e recuperáveis para todos os envolvidos na operação (MAYR *et al.*, 2018).

Com relação a Realidade Aumentada, fundamentada na Gestão à Vista, nota-se que essa tecnologia pode ajudar a realizar o 5S com mais eficiência. Além disso, a Realidade Aumentada pode, por exemplo, substituir os *shadow boards* físicos, pois os elementos virtuais orientam os operadores sobre onde colocar as ferramentas (MAYR, *et al.*, 2018; SALVADORINHO e TEIXEIRA, 2021). Já a integração da gamificação, por meio da Realidade Aumentada, pode motivar os operadores, atribuindo créditos por limpezas realizadas ou posicionamento correto das ferramentas. Observa-se, ainda, que a Realidade Aumentada facilita o uso de *mock-up* digital industrial, no que se refere à exibição de informações do processo em formato visual, facilitando sua interoperação e possibilitando que os operadores tenham um *feedback* visual, em caso de falhas (SHAHIN *et al.*, 2020; ROSIN *et al.*, 2019).

O Fluxo Contínuo, apresenta relações e benefícios com os CPS (Quadro 28).

Quadro 28: Relações e benefícios entre o Fluxo Contínuo e os CPS

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre o Fluxo Contínuo e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
CPS	• A descentralização no Fluxo Contínuo pode ocorrer mediante a implantação de estações de trabalho CPS, possibilitando a negociação de tempos de ciclo e encontrando o ponto ótimo entre a maior utilização de capacidade possível, por parte das estações de trabalho, e um fluxo contínuo de mercadorias.	• A descentralização, por meio dos CPS, possibilita a negociação de tempos de ciclo, identificando o ponto ótimo entre a maior utilização de capacidade possível, por parte das estações de trabalho, e um fluxo contínuo de mercadorias.	Kolberg e Zühke, 2015; Saad <i>et al.</i> , 2021.

Dessa forma, verifica-se que a descentralização, por meio da implementação dos CPS em estações de trabalho, possibilita a negociação de tempos de ciclo, encontrando o ponto ótimo entre a maior utilização de capacidade possível por

parte das estações de trabalho e um fluxo contínuo de mercadorias (KOLBERG E ZÜHLKE, 2015; SAAD *et al.*, 2021).

A prática TPM, por sua vez, apresenta relações e benefícios com oito tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 29.

Quadro 29: Relações e benefícios entre a TPM e as tecnologias da I4.0

Princípio ou Prática Lean	Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a TPM e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
TPM	Aprendizagem de Máquina	<ul style="list-style-type: none"> Os algoritmos de Aprendizagem de Máquina permitem que as manutenções dos equipamentos sejam realizadas com base nas condições/informações de sensores instalados nesses equipamentos (por exemplo, vibração, força, temperatura). 	Intervalos de manutenções são estendidos e, ao mesmo tempo, os eventos de falha são reduzidos.	Laaper e Kiefer, 2020
	Big Data	<ul style="list-style-type: none"> A Big Data auxilia na identificação de padrões de falhas de equipamentos. Com isso, a empresa aplica a manutenção produtiva, aumentando significativamente o tempo médio entre as falhas. A Big Data atua na análise e gestão das atividades de manutenção, identificando as necessidades atuais e futuras, mediante a utilização de algoritmos complexos que preveem defeitos, e aumentam a precisão da expectativa de vida dos equipamentos. 	<ul style="list-style-type: none"> Auxilia na identificação de padrões de falhas de equipamentos, permitindo a aplicação de manutenção produtiva, aumentando significativamente o tempo médio entre as falhas e a vida útil dos equipamentos. 	Küpper <i>et al.</i> , 2017; Valamede e Akkari, 2020; Sanders <i>et al.</i> , 2016
	Computação em Nuvem	<ul style="list-style-type: none"> Em razão da computação em nuvem compartilhar dados sobre os processos e o status dos dispositivos em tempo real, as máquinas e equipamentos podem ser monitorados com frequência. Dessa forma é possível analisar e gerenciar as atividades de manutenção em relação às necessidades atuais e futuras das máquinas e equipamentos. Identifica-se também que, como as máquinas estão interconectadas com sistemas de informação e comunicação na nuvem, quando uma das máquinas falha, esses sistemas enviam notificações para o chão de fábrica e para a equipe de manutenção. A detecção e análise precoce de falhas resultam em menos tempo de espera e prevenção de danos consequentes. 	<ul style="list-style-type: none"> Monitoramento em tempo real das máquinas e equipamentos. Análise e gestão das atividades de manutenção com relação às necessidades atuais e futuras das máquinas e equipamentos. Comunicação em tempo real com a equipe de manutenção. Deteção e análise precoce de falhas, resultando em menos tempo de espera e prevenção de danos consequentes. 	Valamede e Akkari, 2020
	CPS	<ul style="list-style-type: none"> A aplicação dos CPS no TPM permite que a carga, desgaste e defeitos dos equipamentos sejam monitorados durante a operação. A detecção e análise precoce de falhas resultam em menos tempo de inatividade e prevenção de danos consequentes. Além disso, os sensores detectam quando os componentes precisam ser substituídos, transmitindo sinais de alerta sobre a necessidade de uma atividade de manutenção. Dessa forma, os CPS permitem uma manutenção produtiva, em que o equipamento é atendido com base nas condições/informações dos seus sensores, permitindo que se estendam os intervalos de manutenção ao mesmo tempo que se reduz os eventos de falha. Em resumo, a técnica de mineração de dados (data mining) aplicada nos dados gerados pelo CPS, possibilitam a captura de qualquer padrão que possa indicar uma possível falha. Esse sistema permite a previsão antecipada de erros e, assim, medidas corretivas podem ser planejadas e introduzidas da forma mais eficaz. Além disso, tempos de inatividade não planejados podem ser evitados, de forma que os recursos podem ser empregados de forma mais eficaz. 	<ul style="list-style-type: none"> Carga, desgaste e defeitos dos equipamentos podem ser monitorados durante a operação, possibilitando a detecção e análise precoce de falhas, o que resulta em menos tempo de inatividade e prevenção de danos consequentes. Manutenção produtiva, em que o equipamento é atendido com base nas condições/informações dos seus sensores, permitindo que se estenda os intervalos de manutenção ao mesmo tempo que se reduz os eventos de falha. Permite a previsão antecipada de erros, possibilitando que medidas corretivas possam ser planejadas e introduzidas da forma mais eficaz. Tempos de inatividade não planejados podem ser evitados, de forma que os recursos possam ser empregados de forma mais eficaz. 	Mayr <i>et al.</i> , 2018; Davies <i>et al.</i> , 2017; Laaper e Kiefer, 2020; Shahin <i>et al.</i> , 2021
	Realidade Aumentada	<ul style="list-style-type: none"> A Realidade Aumentada pode facilitar o treinamento dos operadores e disponibilizar instruções interativas para a manutenção. Dessa forma, essa tecnologia pode ser utilizada tanto na orientação dos operadores sobre as atividades de manutenção quanto para guá-los na detecção de condições anormais como vibração, ruído e calor, possibilitando que trabalhem nessas anomalias antes que as falhas ocorram. 	<ul style="list-style-type: none"> Facilita o treinamento dos operadores e disponibiliza instruções interativas para a manutenção. Orienta os operadores sobre as atividades de manutenção, guiando-os na detecção de condições anormais, possibilitando que trabalhem nessas anomalias antes que as falhas ocorram. 	Mayr <i>et al.</i> , 2018; Ciano <i>et al.</i> , 2021; Satoglu <i>et al.</i> , 2017
	Realidade Virtual	<ul style="list-style-type: none"> No TPM, a Realidade Virtual facilita o treinamento dos operadores, bem como as instruções de manutenção. Como a manutenção normalmente envolve atividades não recorrentes e sensíveis ao contexto, a interação com especialistas em manutenção torna-se crucial. Ao exibir elementos virtuais, os operadores podem ser orientados remotamente. Além disso, o comissionamento virtual contribui para uma curva de inicialização rápida, mediante simulações realista das plantas de produção. 	<ul style="list-style-type: none"> Facilita o treinamento dos operadores, bem como as instruções de manutenção. Os operadores podem ser orientados remotamente. O comissionamento virtual contribui para uma curva de inicialização rápida, pois a <i>Digital Twin</i> permite uma simulação realista das plantas de produção. 	Mayr <i>et al.</i> , 2018
	Sensorização	<ul style="list-style-type: none"> Com relação ao TPM, os sensores detectam, por exemplo, quando os componentes precisam ser substituídos ou se há necessidades de reabastecimentos de óleo, e enviam sinais para a equipe de manutenção. Além disso, podem ser transmitidos sinais alertando sobre a necessidade de uma atividade de manutenção, acionada por horas operacionais ou uma data específica. Nota-se também que sensores avançados permitem uma manutenção produtiva, em que o equipamento é atendido com base nas condições do sensor (por exemplo, vibração, força, temperatura). Isso permite estender os intervalos de manutenção e, ao mesmo tempo, reduzir os eventos de falha. 	<ul style="list-style-type: none"> Sensores detectam quando os componentes precisam ser substituídos ou se há necessidades de reabastecimentos de óleo, e enviam sinais para a equipe de manutenção. Transmissão de sinais alertando sobre a necessidade de uma atividade de manutenção, acionada por horas operacionais ou uma data específica. Com base nas informações dos sensores é possível estender os intervalos de manutenção e, ao mesmo tempo, reduzir os eventos de falha. 	Davies <i>et al.</i> , 2017; Laaper e Kiefer, 2020
	Simulação	<ul style="list-style-type: none"> No TPM, a simulação permite experimentar diferentes soluções de manutenção em condições seguras e prever manutenções futuras. 	<ul style="list-style-type: none"> Permite experimentar diferentes soluções de manutenção em condições seguras e prever manutenções futuras. 	Ciano <i>et al.</i> , 2021

Com base nos princípios da TPM, os algoritmos de Aprendizagem de Máquina podem ser aplicados, de forma que as manutenções dos equipamentos sejam realizadas com base nas condições/informações de sensores instalados nos equipamentos. Isso permite intervalos de manutenções estendidos e redução dos eventos de falha (LAAPER e KIEFER, 2020). Já Big Data pode ajudar a identificar padrões de falhas de equipamentos. Com os resultados, a empresa

consegue aplicar a manutenção produtiva, aumentando significativamente o tempo médio entre as falhas. Nota-se, ainda, que a Big Data pode atuar na análise e gestão das atividades de manutenção, identificando as necessidades atuais e futuras, por meio de algoritmos complexos que preveem defeitos e aumentam a precisão da expectativa de vida dos equipamentos (SANDERS *et al.*, 2016; KÜPPER *et al.*, 2017; VALAMEDE e AKKARI, 2020).

Com o TPM, verifica-se que, em razão da Computação em Nuvem compartilhar dados sobre os processos e o status dos dispositivos em tempo real, as máquinas e equipamentos podem ser monitoradas com frequência. Dessa forma, é possível analisar e gerenciar as atividades de manutenção, em relação às necessidades atuais e futuras. Identifica-se também que, como as máquinas são interconectadas, por meio da nuvem, com sistemas de informação e comunicação, quando uma delas falha, esses sistemas enviam notificações para o chão de fábrica e para a equipe de manutenção. A detecção e a análise precoce de falhas resultam em menos tempo de espera e prevenção de danos consequentes (VALAMEDE e AKKARI, 2020).

A aplicação dos CPS apoiados pelas práticas da TPM, permite que a carga, o desgaste e os defeitos dos equipamentos sejam monitorados durante a operação. A detecção e análise precoce de falhas, resulta em menos tempo de inatividade e prevenção de danos consequentes (MAYR *et al.*, 2018; MARINELLI *et al.*, 2021). Além disso, os sensores detectam quando os componentes precisam ser substituídos, transmitindo sinais de alerta sobre a necessidade de uma atividade de manutenção (DAVIES *et al.*, 2017). Dessa forma, os CPS possibilitam uma manutenção produtiva, em que o equipamento é atendido com base nas condições/informações dos seus sensores, permitindo que se estendam os intervalos de manutenção, ao mesmo tempo em que se reduzem os eventos de falha (LAAPER e KIEFER, 2020). Em resumo, a técnica de mineração de dados (*data mining*) aplicada nos dados gerados pelo CPS, promovem a captura de qualquer padrão que possa indicar uma possível falha. Esse sistema permite a previsão antecipada de erros e, assim, medidas corretivas podem ser planejadas e introduzidas de forma mais eficaz. Além disso,

tempos de inatividade não planejados podem ser evitados, empregando os recursos de maneira mais eficaz (SHAHIN *et al.*, 2020).

A Realidade Aumentada, por sua vez, pode facilitar o treinamento dos operadores e disponibilizar instruções de manutenção interativas. Dessa forma, essa tecnologia pode ser utilizada, tanto na orientação dos operadores sobre as atividades de manutenção, quanto para guiá-los na detecção de condições anormais, como vibração, ruído e calor, possibilitando que trabalhem nessas anomalias, antes que as falhas ocorram (MAYR *et al.*, 2018; CIANO *et al.*, 2021; SATOGLU *et al.*, 2017). Com relação a Realidade Virtual, observa-se que a tecnologia pode facilitar o treinamento dos operadores, bem como as instruções de manutenção. Como a manutenção normalmente envolve atividades não recorrentes e sensíveis ao contexto, a interação com especialistas em manutenção torna-se crucial. Ao exibir elementos virtuais, os operadores podem ser orientados remotamente. Além disso, o comissionamento virtual contribui para uma curva de inicialização rápida, mediante simulações realistas das plantas de produção (MAYR *et al.*, 2018).

A respeito dos sensores, note-se que eles detectam, por exemplo, quando os componentes precisam ser substituídos ou se há necessidade de reabastecimento de óleo, e enviam sinais para a equipe de manutenção. Além disso, podem ser transmitidos sinais alertando sobre a necessidade de uma atividade de manutenção, acionada por horas operacionais, ou uma data específica (DAVIES *et al.*, 2017). Nota-se também que sensores avançados permitem uma manutenção produtiva, em que o equipamento é atendido com base nas condições do sensor (por exemplo, vibração, força, temperatura). Isso permite estender os intervalos de manutenção e, ao mesmo tempo, reduzir os eventos de falha (LAAPER e KIEFER, 2020). Por fim, a Simulação permite experimentar diferentes soluções de manutenção em condições seguras e prever manutenções futuras (CIANO, *et al.*, 2021).

O *Jidoka*, apresenta relações e benefícios com quatro tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 30.

Quadro 30: Relações e benefícios entre o *Jidoka* e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre o <i>Jidoka</i> e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
CPS	<ul style="list-style-type: none"> Os CPS podem ser usados na implementação do <i>Jidoka</i>, determinando o tempo ideal para o desgaste da ferramenta em um processo CNC, iniciando a troca automática dessa ferramenta, reduzindo assim a necessidade do operador realizar a tarefa repetitiva. 	<ul style="list-style-type: none"> Redução da necessidade do operador em realizar a tarefas repetitivas. 	Saad et al., 2021; Salvadorinho e Teixeira, 2021
IoT	<ul style="list-style-type: none"> A IoT conecta vários recursos às redes de produção, permitindo uma coleta precisa do estado desses recursos. Essa função faz com que o <i>Jidoka</i> detecte anormalidades, como por exemplo uma sequência de produção incorreta, escassez de material e a capacidade de <i>buffer</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> Conexão de vários recursos às redes de produção, permitindo uma coleta precisa do estado desses recursos. Deteção de anormalidades, como uma sequência de produção, escassez de material e a capacidade de <i>buffer</i>. 	Ma et al., 2017
Interação Homem-Máquina	<ul style="list-style-type: none"> A Interação Homem-Máquina sugere que o trabalho deve ser realizado pelo equipamento, de modo que os colaboradores supervisionem as atividades das máquinas. Para esse nível de autonomia, necessita-se o uso de robôs autônomos que produzam sem intervenção direta do operador, seguindo o princípio do <i>Jidoka</i> quanto a automação. 	<ul style="list-style-type: none"> Redução ou eliminação de atividades executadas por operadores, por meio da implantação de robôs autônomos. 	Romero et al., 2019
Robotização	<ul style="list-style-type: none"> Referente ao <i>Jidoka</i>, os robôs autônomos podem produzir sem intervenção direta do operador, detectando e corrigindo os erros de produção. 	<ul style="list-style-type: none"> Robôs autônomos podem produzir sem intervenção direta do operador, detectando e corrigindo os erros de produção. 	Rosin et al., 2019; Salvadorinho e Teixeira, 2021

Assim, fundamentada no *Jidoka*, a Interação Homem-Máquina sugere que o trabalho deve ser realizado pelo equipamento, de modo que os colaboradores supervisionem as atividades das máquinas. Para esse nível de autonomia, necessita-se do uso de robôs autônomos que produzam, sem intervenção direta do operador, seguindo o princípio do *Jidoka* quanto à automação (ROMERO *et al.*, 2019).

Os CPS podem ser usados na implementação do *Jidoka*, determinando, por exemplo, o tempo ideal para o desgaste da ferramenta em um processo CNC, iniciando a troca automática dessa ferramenta e reduzindo assim a necessidade do operador de realizar uma tarefa repetitiva (SAAD *et al.*, 2021; SALVADORINHO e TEIXEIRA, 2021).

Já a IoT conecta vários recursos às redes de produção, permitindo uma coleta precisa do estado desses recursos. Essa função faz com que o *Jidoka* detecte anormalidades, como, por exemplo, na sequência da produção dos operadores, escassez de material e a capacidade de *buffer* (MA *et al.*, 2017).

Com base no *Jidoka*, os robôs autônomos podem produzir, sem intervenção direta do operador, detectando e corrigindo os erros de produção, de acordo com o *Jidoka* (ROSIN *et al.*, 2019; SALVADORINHO e TEIXEIRA, 2021).

A Padronização, também apresenta relações e benefícios com três tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 31.

Quadro 31: Relações/benefícios entre a Padronização e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a Padronização e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
CPS	• Observa-se que o princípio Padronização é considerado importante, com relação ao alcance da modularidade e interoperabilidade, pois todos os CPS em uma fábrica inteligente devem ter um protocolo padrão para comunicação.	• A Padronização permite alcançar a modularidade e interoperabilidade, pois todos os CPS em uma fábrica inteligente devem ter um protocolo padrão para comunicação.	Sanders et al., 2017
Plug & Play	• Para habilitar a tecnologia <i>Plug & Play</i> , com relação à troca flexível de módulos de máquinas, diferentes fabricantes desses módulos devem adotar padrões de integração, ou seja, o princípio Padronização deve estar bem difundido em toda a cadeia de valor.	• A padronização possibilita a troca flexível de módulos de máquinas, de diferentes fabricantes desses módulos, pois esses fabricantes seguem o mesmo padrão.	Sanders et al., 2017
Simulação	• Na padronização, a Simulação permite entender se os componentes padronizados e a estratégia de modularidade cumprem os requisitos do cliente.	• Permite entender se os componentes padronizados e a estratégia de modularidade cumprem os requisitos do cliente.	Ciano et al., 2021

Observa-se, por exemplo que a Padronização é considerada importante para alcançar a modularidade e a interoperabilidade, pois todos os CPS, em uma fábrica inteligente, devem ter um protocolo padrão para comunicação (SANDERS, *et al.*, 2017). Além disso, para habilitar a tecnologia *Plug & Play*, com relação à troca flexível de módulos de máquinas, diferentes fabricantes desses módulos devem adotar padrões de integração, ou seja, a prática Padronização deve estar bem difundida em toda a cadeia de valor (SANDERS *et al.*, 2017). Por fim, com base na Padronização, a Simulação permite entender se os componentes padronizados e a estratégia de modularidade cumprem os requisitos do cliente (CIANO *et al.*, 2021).

Já a Gestão de Pessoas, apresenta relações e benefícios com oito tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 32.

Nota-se a relação da prática Gestão de Pessoas com os CPS, em que o processo de alocação de colaboradores para diferentes operações, com base em sua disponibilidade, é auxiliado pelos CPS, possibilitando a tomada de decisão, independentemente da disponibilidade espacial e temporal do tomador de decisão (SANDERS *et al.*, 2016).

Outra ação observada, refere-se aos gerentes que podem verificar a disponibilidade e alocar os colaboradores em diferentes operações, por meio de dispositivos inteligentes portáteis, como *tablets* ou *smartphones* (SANDERS *et al.*, 2016).

Quadro 32: Relações e benefícios entre a Gestão de Pessoas e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a Gestão de Pessoas e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Verificações e Análises em Tempo Real	<ul style="list-style-type: none"> Na Gestão de Pessoas, o sistema de monitoramento em tempo real acelera os processos de coleta de dados, bem como a recuperação de informações conduzidas para otimizar o processo de tomada de decisão, apoiando o monitoramento da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> Acelera os processos de coleta de dados, bem como a recuperação de informações conduzidas para otimizar o processo de tomada de decisão, apoiando o monitoramento da planta. 	Jarrah et al., 2019
CPS	<ul style="list-style-type: none"> O processo de alocação de funcionários para diferentes operações com base em sua disponibilidade é auxiliado pelo CPS, possibilitando a tomada de decisão independentemente da disponibilidade espacial e temporal do tomador de decisão. 	<ul style="list-style-type: none"> Descentralização na tomada de decisão. 	Sanders et al., 2016
Dispositivos Móveis / Eletrônicos	<ul style="list-style-type: none"> Os gerentes podem verificar a disponibilidade e alocar os trabalhadores em diferentes operações por meio de dispositivos inteligentes portáteis. 	<ul style="list-style-type: none"> Otimização de recursos (mão de obra). 	Sanders et al., 2016
Interação Homem-Máquina	<ul style="list-style-type: none"> Na Gestão de Pessoas, essa tecnologia é identificada como uma ferramenta de redução de esforço físico do operador, reduzindo riscos ergonômicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Redução de esforço físico do operador, reduzindo riscos ergonômicos. 	Romero et al., 2018
Realidade Aumentada	<ul style="list-style-type: none"> A Realidade Aumentada permite que informações sobre as tarefas a serem executadas sejam enviadas aos colaboradores, fornecendo um <i>feedback</i> em tempo real sobre os erros cometidos, em um contexto de treinamento. Além disso, a grande vantagem de usar a Realidade Aumentada para aprendizagem e/ou treinamento está na possibilidade de os operadores interagirem com os objetos "físicos" do mundo real e, simultaneamente, acessar informações virtuais (em tempo real) para orientação em seu campo de trabalho. 	<ul style="list-style-type: none"> Feedback em tempo real sobre os erros cometidos, em um contexto de treinamento. Possibilidade de os operadores interagirem com os objetos "físicos" do mundo real e, simultaneamente, acessar informações virtuais (em tempo real) para orientação em seu campo de trabalho. 	Rosin et al., 2019; Romero et al., 2019
Sensorização	<ul style="list-style-type: none"> Na Gestão de Pessoas, as empresas podem utilizar sensores sem fio de baixo custo para equipar os operadores, permitindo, por exemplo, que sejam alertados sobre a presença de gases perigosos ou a possibilidade de um choque com empilhadeiras ou caminhões próximos. Essa ação garante a segurança do operador, reduzindo incidentes e acidentes. Em outra abordagem, verifica-se que os sensores podem detectar e monitorar os componentes das máquinas, acelerando as operações de configuração interna e protegendo os operadores de acidentes, melhorando a segurança ocupacional. 	<ul style="list-style-type: none"> As empresas podem utilizar sensores na redução de incidentes e acidentes. 	Küpper et al., 2017; Satoglu et al., 2017
Simulação	<ul style="list-style-type: none"> Na Gestão de Pessoas, o uso da simulação pode facilitar a capacitação dos colaboradores, permitindo que sejam treinados em um ambiente simulado. Com isso, pode-se reduzir o índice de acidentes entre as novas contratações e entre os colaboradores experientes, pois todos podem praticar suas atividades em um ambiente simulado. 	<ul style="list-style-type: none"> Permite o treinamento dos colaboradores em um ambiente simulado, reduzindo o índice de acidentes. 	Rosin et al., 2019; Küpper et al., 2017
e-Learning	<ul style="list-style-type: none"> Esse formato de aprendizagem possibilita que os operadores sejam treinados, com a utilização de instruções digitais, as quais são fornecidas em vários níveis e temas, incluindo segurança, procedimentos de instalação/configuração de equipamentos, procedimentos de manutenção e procedimentos de montagem/instruções de trabalho. Cada instrução é baseada em um modelo digital 3D e fornece uma animação que permite ao operador repetir a instrução na vida real, atuando como uma autoavaliação e um teste de compreensão. Além disso, a plataforma de <i>e-learning</i> oferece um ambiente digital (ou seja, um laboratório virtual) para o treinamento dos operadores, combinado a um laboratório físico para acelerar a qualificação e requalificação desses operadores. 	<ul style="list-style-type: none"> Os operadores são treinados com a utilização de instruções digitais, desenvolvidas em vários níveis e temas. Cada instrução é baseada em um modelo digital 3D e fornece uma animação que permite ao operador repetir a instrução na vida real. A plataforma <i>e-learning</i> oferece um ambiente digital (ou seja, um laboratório virtual) para o treinamento dos operadores, combinado a um laboratório físico para acelerar a qualificação e requalificação desses operadores. 	Powell et al., 2018

Já a tecnologia *e-learning* (aprendizagem eletrônica/virtual) apresenta relações com a prática Gestão de Pessoas, pois esse novo formato de aprendizagem possibilita que os operadores sejam treinados, por meio de instruções digitais, fornecidas em vários níveis e temas, incluindo segurança, procedimentos de instalação/configuração de equipamentos, procedimentos de manutenção e procedimentos de montagem/instruções de trabalho. Cada instrução é baseada em um modelo digital 3D e fornece uma animação que permite ao operador repetir a instrução na vida real, atuando como uma autoavaliação e um teste de compreensão. Além disso, a plataforma de *e-learning*, combinada com um laboratório físico, oferece um ambiente digital (ou seja, um laboratório virtual) para o treinamento dos operadores, acelerando a qualificação e requalificação desses operadores (POWELL *et al.*, 2018). Verifica-se também que, na Gestão de Pessoas, a Interação Homem-Máquina é identificada como uma ferramenta de redução do esforço físico do operador, reduzindo os riscos ergonômicos (ROMERO *et al.*, 2018).

A Realidade Aumentada, por sua vez, permite que informações sobre as tarefas a serem executadas sejam enviadas aos colaboradores, fornecendo um *feedback*, em tempo real, sobre os erros cometidos, em um contexto de treinamento. Além disso, a grande vantagem de usar a Realidade Aumentada para aprendizagem e/ou treinamento está na possibilidade de os operadores interagirem com os objetos "físicos" do mundo real e, simultaneamente, acessar informações virtuais (em tempo real) para orientação em seu campo de trabalho (ROSIN *et al.*, 2019; ROMERO *et al.*, 2019).

Com base na Gestão de Pessoas, as empresas podem utilizar sensores sem fio, de baixo custo, para equipar os operadores, permitindo, por exemplo, que sejam alertados sobre a presença de gases perigosos, ou a possibilidade de um choque com empilhadeiras, ou caminhões próximos. Essa ação garante a segurança do operador, reduzindo incidentes e acidentes (KÜPPER *et al.*, 2017). Em outra abordagem, verifica-se que os sensores podem detectar e monitorar os componentes das máquinas, acelerando as operações de configuração interna e protegendo os operadores de acidentes (SATOGLU *et al.*, 2017).

Já o uso da Simulação pode facilitar o treinamento dos colaboradores, permitindo que sejam treinados em um ambiente simulado. Com isso, pode-se reduzir o índice de acidentes entre as novas contratações e entre os colaboradores experientes, pois todos podem praticar suas atividades em um ambiente simulado (ROSIN *et al.*, 2019; KÜPPER *et al.*, 2017).

Por fim, o sistema de monitoramento em tempo real acelera os processos de coleta de dados, bem como a recuperação de informações conduzidas para otimizar o processo de tomada de decisão (instantâneo/rápido) e apoiar o monitoramento da planta (JARRAHI *et al.*, 2019).

A *Poka-Yoke*, apresenta relações e benefícios com oito tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 33.

Quadro 33: Relações e benefícios entre a *Poka-Yoke* e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a <i>Poka-Yoke</i> e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
CPS	<ul style="list-style-type: none"> O princípio <i>Poka-Yoke</i>, quando integrado aos CPS, permite que as máquinas e equipamentos se ajustem automaticamente às irregularidades para garantir a qualidade ideal do produto. Nota-se ainda que, com sua capacidade de computação e sensores conectáveis, os CPS podem ser integrados de forma rápida e flexível em processos de suporte sujeitos a falhas, de maneira que componentes opticamente idênticos possam ser identificados. Por fim, com a utilização de atuadores e sensores é realizada a coleta e análise de dados das operações, com o objetivo de fornecer uma inteligência operacional e evitar possíveis erros de produção, formando a ideia central do <i>Poka-Yoke</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> Máquinas e equipamentos são ajustados automaticamente às irregularidades para garantir a qualidade ideal do produto. Componentes opticamente idênticos podem ser identificados, evitando utilização incorreta. Coleta e análise de dados das operações, com o objetivo de evitar possíveis erros de produção. 	Mayr et al., 2018; Kolberg E Zühke, 2015; Valamede e Akkari, 2020; Marinelli et al., 2021
IoT	<ul style="list-style-type: none"> IoT permite que os produtos se comuniquem com os equipamentos e enviem um aviso quando o produto errado estiver sendo produzido. Para o nível de controle, a IoT é utilizada na comunicação com o equipamento, para que ele reaja a um aviso de erro, paralisando o trabalho ou trocando o produto. Além disso, a IoT pode ser utilizada no monitoramento de parâmetros de qualidade, a fim de sugerir correções ao sistema de produção e adaptar parâmetros, em tempo real. Por fim, a IoT pode auxiliar no envio dos produtos certos para as estações de trabalho certas, redirecionando automaticamente esses produtos em caso de erros de referência. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilita o envio de avisos quando o produto errado estiver sendo produzido, paralisando o processo ou substituindo o produto. Monitoramento de parâmetros de qualidade, a fim de sugerir correções ao sistema de produção e adaptar parâmetros, em tempo real. Envio de produtos certos para as estações de trabalho certas, redirecionando automaticamente esses produtos em caso de erros de referência. 	Rosin et al., 2019
Aprendizagem de Máquina	<ul style="list-style-type: none"> A Aprendizagem de Máquina permite o ajuste automático das máquinas ou equipamentos, às irregularidades da operação. 	<ul style="list-style-type: none"> Garantia da qualidade ideal do produto. 	Mayr et al., 2018
AGV	<ul style="list-style-type: none"> Os AGVs se tornam capazes de se adaptar rapidamente a possíveis falhas de fluxo e informar a nuvem (<i>cloud computing</i>) sobre os problemas encontrados, para posterior análise e resolução. Além disso, os AGVs podem atuar em conjunto com os operadores e se ajustar automaticamente nas diversas funções da operação, considerando possíveis irregularidades, garantindo a qualidade total do produto fabricado. 	<ul style="list-style-type: none"> Adaptação rápida dos AGVs em relação às possíveis falhas de fluxo ou irregularidades na operação, criando registros dessas falhas para correções futuras e garantido melhoria da qualidade. 	Valamede e Akkari, 2020
Autoidentificação / RFID	<ul style="list-style-type: none"> Com a Autoidentificação o <i>Poka-Yoke</i> é automatizado, pois o processo é revisado automaticamente durante sua execução, paralisando-o em caso de erros, garantindo a correta identificação e atribuição das atividades desse processo. Além disso, a Autoidentificação permite a detecção automática de variações no processo, possibilitando ajuste antes que falhas ocorram. 	<ul style="list-style-type: none"> Revisão automática do processo durante sua execução, paralisando-o em caso de erros, garantindo a correta identificação e atribuição das atividades desse processo. 	Mayr et al., 2018; Sanders et al., 2016
Computação em Nuvem	<ul style="list-style-type: none"> A computação em nuvem recebe informações sobre os problemas encontrados nas operações, para posterior análise e resolução. Esses dados são analisados para fornecer uma melhor inteligência operacional, bem como para evitar possíveis erros de produção, o que se relaciona com a ideia central da ferramenta <i>Poka-Yoke</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilita o recebimento de informações em tempo real sobre os problemas encontrados nas operações, para posterior análise e resolução. A análise dos dados em tempo real é utilizada como inteligência operacional para evitar possíveis erros de produção (<i>Poka-Yoke Digital</i>). 	Valamede e Akkari, 2020; Mugalska et al., 2017
Memória Digital de Objetos	<ul style="list-style-type: none"> No <i>Poka-Yoke</i>, a memória digital de objetos permite solicitar os componentes necessários e auxilia na identificação de entregas incorretas. Isso evita agregar valor às peças defeituosas. 	<ul style="list-style-type: none"> Permite solicitar os componentes necessários e auxilia na identificação de entregas incorretas. Isso evita agregar valor às peças defeituosas. 	Mayr et al., 2018
Realidade Aumentada	<ul style="list-style-type: none"> Mediante as vantagens significativas como velocidade, confiabilidade e redução da taxa de falhas, a Realidade Aumentada auxilia o operador, em tempo real, durante as operações manuais, ajudando assim na redução dos erros humanos e atendendo aos objetivos do <i>Poka-Yoke</i>. Dessa forma, a Realidade Aumentada pode habilitar os sistemas digitais <i>Poka-Yokes</i> para funções de trabalho intensivo, por meio de apresentações de informações intuitivas em seus monitores, combinadas com a inteligência do operador. Esses sistemas proporcionam maior eficiência na realização de tarefas manuais, o que minimiza a ocorrência de defeitos, retrabalho e inspeção redundante, melhorando a qualidade do trabalho. 	<ul style="list-style-type: none"> Auxílio ao operador em tempo real, durante as operações manuais, ajudando na redução de erros humanos. Maior eficiência na realização de tarefas manuais, minimizando a ocorrência de defeitos, retrabalho e inspeção redundante, melhorando a qualidade do trabalho. 	Valamede e Akkari, 2020; Saad et al., 2021

Nota-se, por exemplo, que as práticas da *Poka-Yoke* são utilizadas na implementação dos AGVs, tornando esses equipamentos capazes de se adaptar rapidamente a possíveis falhas de fluxo e informar a nuvem (*cloud computing*) sobre os problemas encontrados para posterior análise e resolução. Além disso, os AGVs podem atuar em conjunto com os operadores e se ajustar automaticamente nas diversas funções da operação, considerando possíveis irregularidades e garantindo a qualidade total do produto fabricado. Em resumo, os benefícios esperados dessa interação entre a *Poka-Yoke* e o AGV são: 1. adaptação rápida dos AGVs em relação às possíveis falhas de fluxo, ou irregularidades na operação; 2. criar registros dessas falhas para correções futuras, garantido melhoria da qualidade (VALAMEDE e AKKARI, 2020). Já utilização da Aprendizagem de Máquina, fundamentada na *Poka-Yoke*, pode ser utilizada para ajustar automaticamente as máquinas, ou equipamentos às

irregularidades da operação, garantindo a qualidade ideal do produto (MAYR *et al.*, 2018).

Apoiando-se na filosofia da *Poka-Yoke*, a Autoidentificação faz com que o processo seja revisado automaticamente, durante sua execução, paralisando-o em caso de erros e garantindo a correta identificação e atribuição das atividades desse processo (MAYR *et al.*, 2018). Além disso, a Autoidentificação permite a detecção automática de variações no processo, possibilitando ajustes, antes que falhas ocorram.

Com base nas características da *Poka-Yoke*, a Computação em Nuvem é informada sobre os problemas encontrados nas operações, para posterior análise e resolução. Esses dados são analisados para fornecer uma melhor inteligência operacional e evitar possíveis erros de produção (VALAMEDE e AKKARI, 2020; MRUGALSKA *et al.*, 2017).

Verifica-se também que a prática *Poka-Yoke*, atuando como base para os CPS, permite que as máquinas e equipamentos se ajustem automaticamente às irregularidades, garantindo a qualidade ideal do produto (MAYR *et al.*, 2018; MARINELLI *et al.*, 2021). Nota-se, ainda, que, com sua capacidade de computação e sensores conectáveis, os CPS podem ser integrados, de forma rápida e flexível, em processos de suporte sujeitos a falhas (*Poka-Yoke*). Dessa forma, componentes opticamente idênticos podem ser identificados (KOLBERG e ZÜHLKE, 2015). Por fim, com a utilização de atuadores e sensores, realiza-se a coleta e análise de dados das operações, fornecendo uma inteligência operacional e evitando possíveis erros de produção, conforme a ideia central da *Poka-Yoke* (VALAMEDE e AKKARI, 2020).

Com apoio da *Poka-Yoke*, a IoT permite que os produtos se comuniquem com os equipamentos e enviem um aviso, quando o produto incorreto estiver sendo produzido. Para o nível de controle, a IoT faz com que os equipamentos reajam a um aviso de erro, parando o trabalho, ou trocando produtos. Além disso, a IoT pode ser utilizada no monitoramento de parâmetros de qualidade, sugerindo correções ao sistema de produção e adaptação de parâmetros, em tempo real.

Por fim, nota-se que a IoT pode auxiliar no envio dos produtos certos para as estações de trabalho certas, redirecionando automaticamente esses produtos, em caso de erros de referência (ROSIN *et al.*, 2019).

Na *Poka-Yoke*, a Memória Digital de objetos permite solicitar os componentes necessários e auxilia na identificação de entregas incorretas. Isso evita agregar valor às peças defeituosas (MAYR *et al.*, 2018).

Nota-se também que, mediante as vantagens significativas, como velocidade, confiabilidade e redução da taxa de falhas, a Realidade Aumentada auxilia o operador, em tempo real, durante as operações manuais, auxiliando na redução dos erros humanos, conforme os princípios do *Poka-Yoke*. Assim, com o apoio de informações intuitivas em seus monitores, combinadas com a inteligência do operador, a Realidade Aumentada pode habilitar os sistemas digitais *Poka-Yokes* para funções de trabalhos intensivos. Esses sistemas proporcionam maior eficiência na realização de tarefas manuais, minimizando a ocorrência de defeitos, retrabalhos e inspeções redundantes, melhorando a qualidade do trabalho (VALAMEDE e AKKARI, 2020; SAAD *et al.*, 2021).

Já o *Heijunka*, apresenta relações e benefícios com quatro tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 34.

Quadro 34: Relações e benefícios entre o *Heijunka* e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre o <i>Heijunka</i> e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Big Data	• Por meio da adoção da Big Data, o <i>Heijunka</i> se torna muito mais realizável, permitindo maiores recursos de otimização de planejamento e agendamento de tarefas, suportados por um monitoramento em tempo real da execução dessas tarefas. Isso permite pequenos ajustes na programação, relativos a eventos inesperados ou turbulências na demanda real versus previsão.	• Otimiza o planejamento e agendamento de tarefas, suportados por um monitoramento em tempo real, possibilitando pequenos ajustes na programação, relativos a eventos inesperados ou turbulências na demanda real versus previsão.	Mayr <i>et al.</i> , 2018; Laaper e Kiefer, 2020; Powell <i>et al.</i> , 2018
Inteligência Artificial	• Um algoritmo genético multiobjetivo dessa tecnologia pode ser adotado para otimizar e nivelar a carga das estações de trabalho, com base no princípio <i>Heijunka</i> .	• Otimização e nivelamento da carga das estações de trabalho.	Ciano <i>et al.</i> , 2021
Realidade Virtual	• A respeito do <i>Heijunka</i> , nota-se que a Realidade Virtual possibilita um passeio virtual por um <i>layout</i> simulado, com o objetivo de testar se a configuração permite um processo fluido e movimentos corretos e seguros.	• Possibilita um passeio virtual por um <i>layout</i> simulado, com o objetivo de testar se a configuração permite um processo fluido e movimentos corretos e seguros.	Ciano <i>et al.</i> , 2021
Sensorização	• No <i>Heijunka</i> , a utilização de sensores e dados para fornecer transparência total em gargalos, permite que a empresa melhore o foco de seus esforços na eficiência operacional, aumentando o OEE.	• Sensores e dados fornecem transparência total em gargalos, permitindo que a empresa melhore o foco de seus esforços na eficiência operacional, aumentando o OEE.	Küpper <i>et al.</i> , 2017

Observa-se que no *Heijunka*, a análise de dados históricos de execuções de produção, realizada pela Big Data, melhora a qualidade das previsões das operações, podendo estabilizar o seu planejamento, criando programações otimizadas, com base na disponibilidade da máquina, qualidade do processo e requisitos de recursos. Assim, mediante a adoção da Big Data, o *Heijunka* se

torna muito mais realizável, permitindo maiores recursos de otimização de planejamento e agendamento de tarefas, suportados por um monitoramento em tempo real da execução dessas tarefas. Isso permite pequenos ajustes na programação, devido a eventos inesperados, ou imprevistos, na produção, bem como turbulência na demanda real versus previsão (MAYR *et al.*, 2018; LAAPER e KIEFER, 2020; POWELL *et al.*, 2018).

A Inteligência Artificial, por sua vez, apresenta relações com o *Heijunka*, pois um algoritmo genético multiobjetivo dessa tecnologia pode ser adotado para otimizar e nivelar a carga das estações de trabalho, com base na prática *Heijunka* (CIANO *et al.*, 2021). Com apoio do *Heijunka*, nota-se que a Realidade Virtual possibilita um passeio virtual por um *layout* simulado, com o objetivo de testar se a configuração permite um processo fluido e movimentos corretos e seguros (CIANO *et al.*, 2021).

Por fim, com o auxílio dos fundamentos do *Heijunka*, verifica-se que a utilização de sensores e dados, para fornecer transparência total em gargalos, permite que a empresa melhore o foco de seus esforços na eficiência operacional, aumentando o OEE (KÜPPER *et al.*, 2017).

O SMED, apresenta relações e benefícios com quatro tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 35.

Quadro 35: Relações e benefícios entre o SMED e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre o <i>SMED</i> e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
IoT	<ul style="list-style-type: none"> A IoT pode beneficiar o conceito de SMED, ao fornecer informações incorporadas ao produto que podem ser comunicadas diretamente à máquina que requer uma troca, garantindo menor tempo nessa troca, por meio de uma comunicação direta. 	<ul style="list-style-type: none"> Menor tempo na troca de ferramentas ou dispositivos, por meio de uma comunicação direta e em tempo real. 	Saad <i>et al.</i> , 2021; Salvadorinho e Teixeira, 2021
<i>Plug & Play</i>	<ul style="list-style-type: none"> Os sistemas <i>Plug & Play</i> são equipados com comportamento de auto-otimização e aprendizado de máquina, permitindo que as empresas adaptem as máquinas de acordo com os produtos, produzindo lotes menores. As operações a serem realizadas em uma peça são inicialmente carregadas na própria peça, por meio de etiquetas RFID. À medida que a peça chega à respectiva máquina, ela se comunica diretamente com a máquina por meio de receptores RFID. 	<ul style="list-style-type: none"> Mudança mais rápida dos parâmetros da máquina, de acordo com as instruções lidas na peça. O tempo de configuração nas organizações é substancialmente reduzido por meio da auto-otimização de máquinas e da comunicação peça-máquina. 	Sanders <i>et al.</i> , 2016
<i>Plug & Produce</i>	<ul style="list-style-type: none"> A tecnologia <i>Plug & Produce</i> transfere o SMED de uma única estação de trabalho para linhas de produção inteiras, difundindo esse princípio de forma massiva nas atividades das operações. 	<ul style="list-style-type: none"> O SMED é transferido de uma única estação de trabalho para linhas de produção inteiras, difundindo esse princípio de forma massiva nas atividades das operações. 	Kolberg e Zühlke, 2015
Sensorização	<ul style="list-style-type: none"> Com a implantação dos princípios do <i>Lean</i>, como SMED, as empresas podem remover atividades que não agregam valor, acelerando significativamente o processo. Com isso, a utilização de sensores possibilita que as máquinas identifiquem produtos automaticamente e carreguem o programa e as ferramentas adequadas sem intervenção manual. Como a mudança é automatizada, os operadores podem se concentrar na execução de atividades que agregam valor. 	<ul style="list-style-type: none"> As empresas podem remover atividades que não agregam valor, acelerando significativamente o processo. Devido à automatização promovida pelos sensores, os operadores podem se concentrar na execução de atividades que agregam valor. 	Küpper <i>et al.</i> , 2017

A primeira tecnologia é a *Plug & Play*, a qual é equipada/programada com comportamento de auto-otimização e aprendizado de máquina, permitindo que

as empresas adaptem as máquinas, de acordo com os produtos, produzindo lotes menores. Assim, as operações a serem realizadas são inicialmente carregadas com as informações existentes na própria peça que será trabalhada, por meio de etiquetas RFID e, à medida que a peça chega à respectiva máquina, ela se comunica diretamente com a máquina, por meio desses receptores RFID (SANDERS *et al.*, 2016).

Já a *Plug & Produce* transfere o SMED de uma única estação de trabalho para linhas de produção inteiras, difundindo essa prática, de forma massiva, nas atividades das operações (KOLBERG e ZÜHLKE, 2015). A IoT, por sua vez, pode beneficiar o conceito de SMED, ao fornecer informações incorporadas ao produto que podem ser comunicadas diretamente à máquina que requer uma troca, garantindo um menor tempo nessa troca, por meio de uma comunicação direta (SAAD *et al.*, 2021; SALVADORINHO e TEIXEIRA, 2021).

Por fim, com a implementação do SMED, as empresas podem remover atividades que não agregam valor, acelerando significativamente o processo. Com isso, a utilização de sensores possibilita que as máquinas identifiquem produtos automaticamente e carreguem o programa e as ferramentas adequadas, sem intervenção manual. Como a mudança é automatizada, os operadores podem se concentrar na execução de atividades que agregam valor (KÜPPER *et al.*, 2017).

Assim, com base na Integração com Fornecedores, os recursos da Big Data são utilizados para uma melhor análise dos dados referentes à demanda, identificando oportunidades em tempo real (SATOGLU *et al.*, 2017). Por fim, na Integração com Clientes, a Big Data pode analisar um grande volume de dados provenientes dos produtos já no campo, identificando as necessidades e comportamentos dos clientes, fornecendo produtos e soluções mais sustentáveis e adequados aos requisitos desses clientes (SANDERS *et al.*, 2016).

A Integração com Fornecedores, apresenta relações e benefícios com três tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 36.

Quadro 36: Relações e benefícios entre a Integração com Fornecedores e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a Integração com Fornecedores e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Big Data	• Na Integração com Fornecedores, os recursos da Big Data são utilizados para uma melhor análise dos dados referentes à demanda, identificando oportunidades em tempo real.	• Melhor análise dos dados referentes à demanda, identificando oportunidades em tempo real.	Satoglu et al., 2017
IoT	• Na integração com fornecedores, a IoT proporciona os seguintes benefícios/atributos: - Uma plataforma compartilhada de dados em tempo real, capacitando o envolvimento do fornecedor (armazém compartilhado e situação de KPIs). - Uma plataforma compartilhada de dados em tempo real, permitindo que o fornecedor de transporte e logística planeje melhor suas entregas. - Uma plataforma compartilhada de dados em tempo real, capacitando o sistema Kanban, gerenciado diretamente pelo fornecedor.	• Disponibilidade de uma plataforma compartilhada de dados em tempo real, capacitando o envolvimento do fornecedor (armazém compartilhado e situação de KPIs), permitindo que o fornecedor de transporte e logística planeje melhor suas entregas e capacitando o sistema Kanban, gerenciado diretamente pelo fornecedor.	Ciano et al., 2021
Computação em Nuvem	• Os mecanismos tradicionais de comunicação entre os parceiros de uma empresa são renovados por meio da computação em nuvem e dos serviços de computação móvel. Assim, pode-se manter uma integração fácil e um melhor relacionamento entre os negócios. Dessa forma, a colaboração, a sincronização e os melhores mecanismos de comunicação servem como facilitadores para manter um feedback eficaz do fornecedor.	• Manutenção de um feedback eficaz e em tempo real com o fornecedor.	Sanders et al., 2016

Nota-se também que os mecanismos tradicionais de comunicação entre os parceiros de uma empresa são renovados, por meio da computação em nuvem e dos serviços de computação móvel. Assim, pode-se manter uma integração fácil e um melhor relacionamento entre os negócios. Dessa forma, a colaboração, a sincronização e os melhores mecanismos de comunicação servem como facilitadores para manter um *feedback* eficaz do fornecedor (SANDERS *et al.*, 2016). Por fim, a IoT proporciona os seguintes benefícios, quando integrada a gestão dos fornecedores (CIANO *et al.*, 2021):

- Uma plataforma compartilhada de dados em tempo real, capacitando o envolvimento do fornecedor (armazém compartilhado e situação de KPIs).
- Uma plataforma compartilhada de dados em tempo real, permitindo que o fornecedor de transporte e logística planeje melhor suas entregas.
- Uma plataforma compartilhada de dados em tempo real, capacitando o sistema *Kanban*, gerenciado diretamente pelo fornecedor.

O *Gemba* apresenta relações e benefícios com duas tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 37. Dessa forma, no contexto do *Gemba*, a Realidade Aumentada permite que os gerentes vejam e ouçam remotamente os processos e os operadores, adicionando dados detalhados para remover a subjetividade, possibilitando uma melhor tomada de decisão (ROMERO *et al.*, 2020).

Já o *Gemba* aplicado aos ambientes de Realidade Virtual, podem oferecer uma visão detalhada de um sistema de produção, permitindo que os gerentes simulem e analisem processos de trabalho e os visualizem de diferentes

perspectivas, sem qualquer interrupção de um recurso de produção. Consequentemente, essa ação contribui para a resolução de problemas e melhoria contínua, com base em simulações avançadas e análises realizadas pela Big Data (ROMERO *et al.*, 2020).

Quadro 37: Relações e benefícios entre o *Gemba* e as tecnologias da I 4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre o <i>Gemba</i> e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Realidade Aumentada	<ul style="list-style-type: none"> No contexto do <i>Gemba</i>, a Realidade Aumentada permite que os gerentes vejam e ouçam remotamente os processos e operadores, adicionando dados detalhados para remover a subjetividade, possibilitando uma melhor tomada de decisão. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilita que os gerentes vejam e ouçam remotamente os processos e operadores, adicionando dados detalhados para remover a subjetividade, permitindo uma melhor tomada de decisão. 	Romero et al., 2020
Realidade Virtual	<ul style="list-style-type: none"> Com relação ao <i>Gemba</i>, os ambientes de Realidade Virtual podem oferecer uma visão detalhada de um sistema de produção, permitindo que os gerentes simulem e analisem processos de trabalho e os visualizem de diferentes perspectivas, sem qualquer interrupção de um recurso de produção. Consequentemente, essa ação contribui para a resolução de problemas e melhoria contínua, com base em simulações avançadas e análises realizadas pela Big Data. 	<ul style="list-style-type: none"> Permite que os gerentes simulem e analisem processos de trabalho e os visualizem de diferentes perspectivas, sem qualquer interrupção de um recurso de produção. Contribui para a resolução de problemas e melhoria contínua com base em simulações avançadas e análises realizadas pela Big Data. 	Romero et al., 2020

Por fim, a integração com Clientes apresenta relações e benefícios com duas tecnologias da Indústria 4.0, conforme Quadro 38.

Quadro 38: Relações e benefícios entre a Integração com Clientes e as tecnologias da I4.0

Tecnologia da Indústria 4.0	Relações entre a Integração com Clientes e a Indústria 4.0	Benefícios Esperados	Autores
Big Data	<ul style="list-style-type: none"> A Big Data analisa o grande volume de dados provenientes dos produtos já no campo, identificando as necessidades e comportamentos dos clientes, a fim de fornecer produtos e soluções mais sustentáveis e adequados aos requisitos desses clientes. 	<ul style="list-style-type: none"> Fornecimento de produtos e soluções mais sustentáveis e adequados aos requisitos desses clientes. 	Sanders et al., 2016
Manufatura Aditiva	<ul style="list-style-type: none"> A Manufatura Aditiva proporciona maior Integração com clientes, pois facilita o projeto e a fabricação de produtos customizados, de acordo com as expectativas do cliente. Permite ainda a produção de protótipos para testar se os elementos modulares e padronizados realmente atendem aos requisitos dos clientes. 	<ul style="list-style-type: none"> Proporciona maior Integração com clientes, pois facilita o projeto e a fabricação de produtos customizados, de acordo com as expectativas do cliente. Permite a produção de protótipos para testar se os elementos modulares e padronizados realmente atendem aos requisitos dos clientes. 	Satoglu et al., 2017; Ciano et al., 2021

Assim, na Integração com Clientes, a Big Data pode analisar um grande volume de dados, provenientes dos produtos já no campo, identificando as necessidades e comportamentos dos clientes, fornecendo produtos e soluções mais sustentáveis e adequados aos requisitos desses clientes (SANDERS *et al.*, 2016). Já a Manufatura Aditiva proporciona maior Integração com Clientes, pois facilita o projeto e a fabricação dos produtos customizados, de acordo com as expectativas do cliente. Permite ainda a produção de protótipos para testar se os elementos modulares e padronizados realmente atendem aos requisitos dos clientes (SATOGLU *et al.*, 2017; CIANO *et al.*, 2021).

4.3.2. ETAPA DE SUGESTÃO

A etapa de sugestão é fundamentada nas definições anteriores da etapa de conscientização e tem o propósito de definir as amplitudes das variáveis e suas escalas de medição e selecionar a ferramenta de processamento dessas informações.

4.3.2.1 DEFINIÇÃO DAS AMPLITUDES DAS VARIÁVEIS E ESCALA DE MEDIÇÃO

Considerando que o grau de maturidade primário a ser medido refere-se ao *Lean* (variáveis de entrada), será considerada a mesma amplitude para a medição das variáveis de saída (tecnologias da Indústria 4.0). Ou seja, a pontuação apresentada pelas tecnologias da Indústria 4.0 é o resultado do grau de maturidade do conjunto de práticas *Lean* que podem apoiar a implementação dessas tecnologias.

Para tanto, será utilizada a amplitude sugerida por Nightingale *et al.* (2012), demonstrada na aplicação da ferramenta LESAT. De acordo com os autores, a ferramenta conta com cinco níveis de maturidade (apresentados na Figura 10), variando do nível um (baixa aderência ao *Lean*) ao nível cinco (organização de classe mundial com relação à aderência ao *Lean*). Para aquelas práticas *Lean* que são avaliadas por mais de uma prática da LESAT, será utilizada a média dos resultados dessas práticas para a definição da pontuação final, conforme recomendado por Nightingale *et al.* (2012).

Como Nightingale *et al.* (2012) definem que, a partir do nível 3, a empresa já possui a prática *Lean* amplamente difundida, será considerado nesta tese que os níveis 3, 4 ou 5 podem representar influências positivas, ou definição de prioridade para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Portanto, quando as pontuações forem 1 ou 2, significa que as práticas *Lean* não alcançaram um resultado que possa apoiar a implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

Por fim, tem-se que a pontuação final das variáveis de saída estará baseada na pontuação final das variáveis de entrada.

4.3.2.2 SELEÇÃO DA FERRAMENTA DE PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES

Para esta tese, será utilizada a Rede Neural Artificial (RNA) como ferramenta combinacional de processamento das informações das variáveis de entrada para o cálculo das variáveis de saída. A RNA é considerada adequada para essa aplicação, pois:

- É um modelo combinacional que vem sendo amplamente utilizado na organização, classificação e resumo de dados, bem como padrões de discernimento entre os dados de entrada, exigindo poucas suposições e alcançando um alto grau de precisão na previsão de dados de saída. Essas características tornam a rede neural uma ferramenta potencial para classificação e previsão de dados (WONG e SELVI, 1998; SABERI e YUSUFF, 2012).
- A ferramenta possui uma alta capacidade de processamento de informações e considera as entradas, independente das características e amplitudes, ponderando e combinando seus valores para determinar a saída resultante (WILLIS *et al.*, 1991; MATANA *et al.*, 2020).
- Além disso, como o conhecimento relativo às tecnologias da Indústria 4.0 está em evolução, a RNA pode ser uma fonte de armazenamento do conhecimento atual, possibilitando a aprendizagem, automatização, organização, classificação e resumo (resultado) dos dados a partir desse conhecimento, possibilitando que novas informações sejam inseridas para manter-se sempre atualizada, de modo que processe as definições mais recentes (HAYKIN, 2009; MATANA, 2020).

O modelo matemático apresentado pela Rede Neural Artificial é inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes, que adquirem conhecimento por meio da experiência (HAYKIN, 1999; MATANA *et al.*, 2020). As principais características da RNA são: generalizar a função de aprendizado para soluções similares, as quais foram treinadas para aprender a partir de informações incompletas (HRYCEJ, 1992; TSOUKALAS e UHRIG, 2007, MATANA *et al.*,

2020). Como característica, a RNA apresenta seus elementos fundamentais: neurônios, arquitetura e aprendizagem (FERNANDES, 2003).

O neurônio é a unidade de processamento utilizada na simulação do comportamento de um neurônio biológico, composto por várias entradas, pesos que multiplicam essas entradas, uma função de ativação e uma saída cujo valor depende diretamente da somatória das entradas ponderadas pelos respectivos pesos e pela função de ativação (HAYKIN, 1999, MATANA *et al.*, 2020). A Figura 25 ilustra um neurônio artificial.

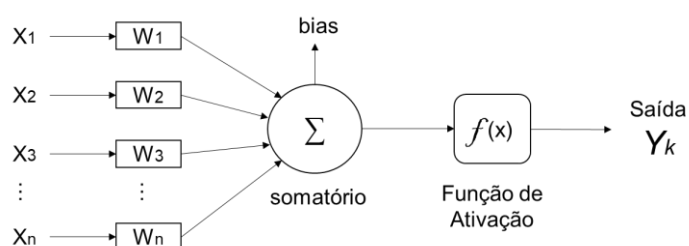


Figura 25 – Neurônio Artificial
(traduzido de Haykin, 1999)

A arquitetura de uma RNA pode ser representada por um grafo direcionado, em que um nó representa um neurônio e as linhas representam as entradas ou saídas desses neurônios. A classificação da RNA ocorre, geralmente, conforme sua arquitetura em: redes de uma única camada, redes de múltiplas camadas e redes recorrentes. As redes de uma única camada têm como característica apenas uma camada de neurônios que produzem diretamente a saída, a partir das entradas. As redes de múltiplas camadas, por sua vez, apresentam camadas de neurônios escondidas entre as entradas e os neurônios de saída. As redes recorrentes utilizam as informações (com certo atraso) das saídas como entradas auxiliares para processamento das informações (HAYKIN, 2009, MATANA *et al.*, 2020). A Figura 26 apresenta as possíveis arquiteturas das RNA por camadas.

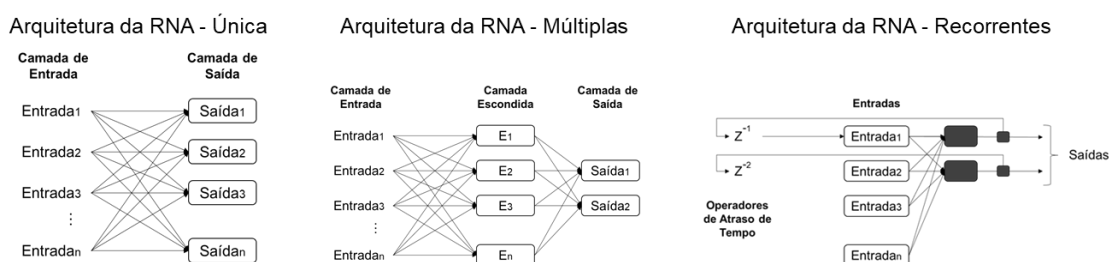


Figura 26 – Arquiteturas da RNA
(traduzido de Haykin, 2009)

As técnicas de aprendizagem da RNA seguem a mesma classificação de qualquer tecnologia de aprendizado, a saber: supervisionadas, não supervisionadas e por reforço. A execução da aprendizagem supervisionada ocorre, a partir de uma amostra de dados de entrada e saída conhecidos e previamente correlacionados. Já a aprendizagem não supervisionada é realizada, quando não se sabe das saídas, porém, a partir de dados de entrada conhecidos, a RNA deve encontrar automaticamente suas similaridades/dissimilaridades para associá-las estatisticamente, formando suas saídas. Por fim, a aprendizagem por reforço permite que a RNA mapeie a relação entrada-saída, mediante um indicador de desempenho externo ao sistema avaliado (HAYKIN, 2009, MATANA *et al.*, 2020).

Assim, considerando os pontos abordados anteriormente, adota-se nesta tese a arquitetura de neurônios artificiais de múltiplas camadas com aprendizagem supervisionada, denominada *Perceptron* de Múltiplas Camadas (*Multi-Layer Perceptron* – MLP). A RNA de arquitetura MLP é apropriada para a função de ferramenta de processamento de informações desta tese, pois, com uma aprendizagem adequada e um número suficiente de camadas ocultas, essa ferramenta organiza, classifica e apresenta o resumo de dados, bem como os padrões de discernimento entre os dados de entrada, exigindo poucas suposições e alcançando um alto grau de precisão na previsão de dados de saída (WONG e SELVI, 1998; SABERI e YUSUFF, 2012). Além disso, a rede MLP utiliza uma técnica de aprendizado supervisionado chamada *backpropagation* (BP), a qual é amplamente sugerida como o procedimento mais eficiente no treinamento de redes neurais e usada em conjunto com um método

de otimização, como gradiente descendente (JOZANIKOHAN *et al*, 2015; JANIKOVA e BEZAK, 2016; MATANA *et al.*, 2020). A Figura 27 apresenta a RNA como ferramenta combinacional de processamento das informações, em que pode ser observada a arquitetura MLP relacionando as variáveis de entrada e de saída.

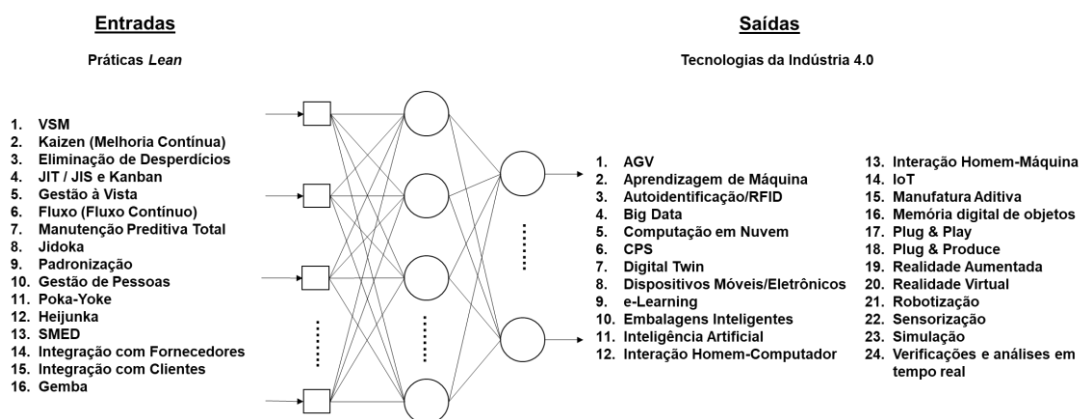


Figura 27 – RNA de arquitetura MLP como ferramenta combinacional de processamento das informações

Isso atende a um dos objetivos específicos desta tese, referente à seleção de uma ferramenta de processamento das informações que auxilie a relacionar as tecnologias da Indústria 4.0 com as práticas *Lean*.

4.3.3. ETAPA DE DESENVOLVIMENTO

A etapa de desenvolvimento do ciclo de projeto é fundamentada nas definições da etapa de sugestão e tem como objetivo definir o modelo matemático.

4.3.3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Com base nas definições da etapa de sugestão, foi estabelecido que a ferramenta combinacional de processamento de dados é uma RNA de arquitetura MLP, com 16 entradas (práticas *Lean*) e 24 saídas (tecnologias da Indústria 4.0).

Iniciando pelas definições matemáticas das entradas, tem-se que, por serem escalares de amplitude unitária (1 a 5), devem assumir o valor correspondente ao nível de maturidade do *Lean*. As saídas, por também serem escalares de amplitude unitária (de 1 a 5), devem assumir valores relativos aos graus de maturidade correspondentes as práticas *Lean* que influenciam as tecnologias da Indústria 4.0. Como a RNA utilizada é uma MLP, define-se, então, a quantidade de neurônios da camada escondida, que pode influenciar no erro da resposta na saída e na estabilidade da rede neural (KE e LIU, 2008; MATANA *et al.*, 2020). Para isso, é adotado o método de Kolmogorov, que determina a quantidade de neurônios na camada escondida de uma MLP, assegurando estabilidade (SHEELA e DEEPA, 2013), apresentado pela equação (1) (KURKOVA, 1992):

$$(1) \quad h = 2n + 1$$

em que:

h = quantidade de neurônios da camada escondida

n = número de variáveis de entrada da rede neural

Assim, como a MLP proposta possui 16 variáveis de entrada, devem-se estruturar 33 neurônios da camada escondida, como ilustra a equação (2).

$$(2) \quad h = 2 * 16 + 1 \quad \therefore h = 33$$

Para a construção da MLP, utiliza-se sua expressão matemática funcional (3) (YEGNANARAYANA, 2006; HAYKIN, 2009).

$$(3) \quad Y = f(\sum W X + B)$$

em que:

Y = vetor das saídas

X = vetor das entradas

B = vetor de bias

W = matriz de pesos

f = função de ativação

Em relação à função de ativação do neurônio, adota-se a tangente hiperbólica, tanto na camada escondida quanto nos neurônios de saída (HAYKIN, 1999), pois entende-se que, em uma MLP, é a melhor função de ativação para se minimizar

o erro de saída (SWINGLER, 2001; YEGNANARAYANA, 2006; KARLIK e OLGAC, 2010; MATANA *et al.*, 2020). A função de ativação tangente hiperbólica tem faixa de saída de -1 a 1 e pode ser apresentada pela expressão (4) e Figura 28 (ZAMANLOOY e MIRHASSANI, 2014).

$$(4) \quad f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

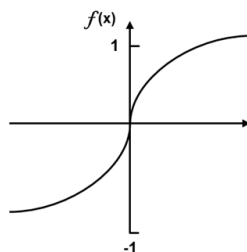


Figura 28 - Função de ativação tangente hiperbólica

Com isso, adicionando-se a função de ativação de tangente hiperbólica (4) na expressão funcional da MLP (3), obtém-se a expressão matemática da MLP (5).

$$(5) \quad Y = \tanh(\sum W X + B)$$

Complementarmente, como a MLP possui duas camadas de neurônios (camada escondida e camada de saída) e para ambas foi selecionada a função de ativação de tangente hiperbólica, a expressão matemática final é (6):

$$(6) \quad Y = \tanh(\sum W_e \tanh(\sum W_s X + B_s) + B_e)$$

em que:

Y = vetor de saídas

X = vetor de entradas

W_e = matriz de pesos da camada escondida

W_s = matriz de pesos da camada de saída

B_e = vetor de *bias* da camada escondida

B_s = vetor de *bias* da camada de saída

Para a aplicação dessa expressão (6), tendo a tangente hiperbólica como função de ativação da MLP, com limites de -1 a 1, é necessário normalizar as entradas e, posteriormente, desnormalizar as saídas para os mesmos limites. Com isso, define-se a transformação linear (7), tanto para a normalização, aplicando sobre as entradas para encontrar o vetor X, quanto para a desnormalização, calculando sobre o vetor Y, para definir as saídas.

$$(7) \quad S = \frac{(S_{max} - S_{min}) * (E - E_{min})}{(E_{max} - E_{min})} + S_{min}$$

em que:

S = saída da transformação linear

E = entrada da transformação linear

S_{max} = 1 para normalização / 5 para desnormalização

S_{min} = -1 para normalização / 1 para desnormalização

E_{max} = 5 para normalização / 1 para desnormalização

E_{min} = 1 para normalização / -1 para desnormalização

Assim, o modelo matemático é apresentado na Figura 29, a partir da expressão matemática (6).

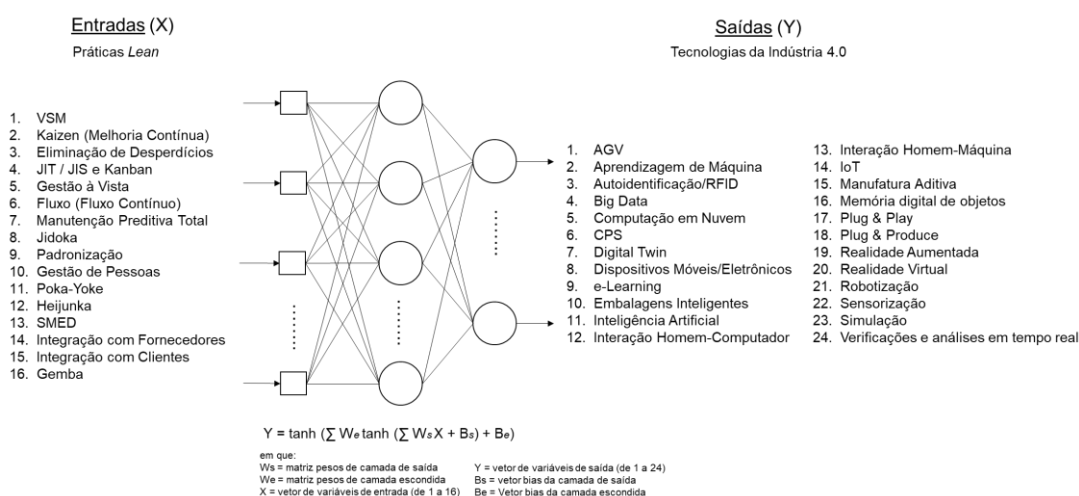


Figura 29 – Modelo matemático

Definido o modelo matemático, deve-se, por fim, determinar os valores dos pesos (matrizes W) e dos bias (vetores B) para apresentar as relações causais entre entradas (vetor X) e saídas (vetor Y). Para tanto, a rede neural MLP deve aprender de forma supervisionada, a partir de pesos e bias iniciais, como recomendado na etapa de sugestão. Dessa forma, é necessário construir uma amostra de dados para aprendizagem, na qual exista uma correlação conhecida entre as entradas e as saídas. Assim, estabelecem-se as regras, fundamentadas nos requisitos e critérios de aceitação do método definidos respectivamente nas Seções 4.1.3 e 4.1.4:

- Práticas *Lean* com grau de maturidade igual a zero não devem apresentar influências nas tecnologias da Indústria 4.0.

Para codificação do modelo matemático ao algoritmo do Matlab, utiliza-se a ferramenta *nntool*, por acessar a biblioteca de redes neurais desse *software* e permitir uma composição amigável da MLP. Com isso, as propriedades da rede neural foram selecionadas: a rede neural é tipo MLP com retropropagação, a camada escondida possui 33 neurônios; e a função de ativação é a tangente hiperbólica. As propriedades da função de treinamento, função de adaptação e função de desempenho são padrões do algoritmo do Matlab. Essas propriedades são apresentadas na Figura 30. Assim, a codificação computacional que representa o modelo matemático é estabelecida na Figura 31. A matriz de amostras de aprendizado supervisionado, estabelecida na etapa de desenvolvimento e apresentada no Quadro 39, também é codificada em algoritmo do Matlab para o treinamento da MLP. As informações referentes às 16 entradas são convertidas em vetores denominados Input, com seus respectivos vetores de saída, nomeados de Output.

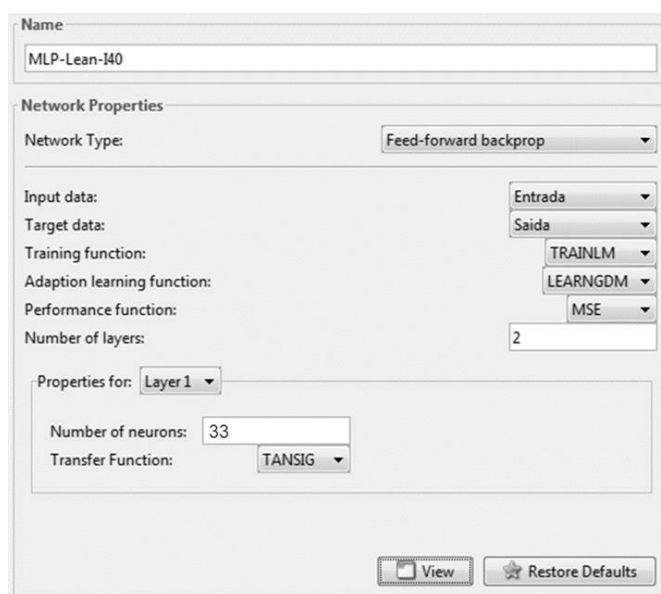


Figura 30 – Propriedades da MLP no Matlab

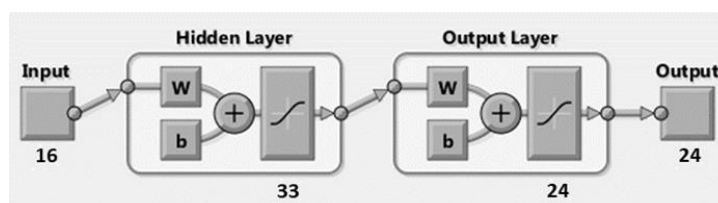


Figura 31 – Código computacional do modelo matemático

Quadro 41 – Matriz de pesos (Ws) e vetor de bias (Bs) da camada de saída

Matriz de Pesos da Camada de Saída																								
Pesos das Conexões entre Neurônios da Camada Escondida e Saída																								
	WS1.1	WS1.2	WS1.3	WS1.4	WS1.5	WS1.6	WS1.7	WS1.8	WS1.9	WS1.10	WS1.11	WS1.12	WS1.13	WS1.14	WS1.15	WS1.16	WS1.17	WS1.18	WS1.19	WS1.20	WS1.21	WS1.22	WS1.23	WS1.24
WS1.1	-0,207	-1,13795	1,687218	-0,32001	0,850323	-1,14488	4,388716	-2,67341	-5,74689	-0,4753	-0,60807	-2,21459	-1,39521	0,321898	-3,53078	-1,3255	2,48185	-0,66834	-1,00395	0,223545	-1,67162	4,16641	1,475002	-2,62871
WS1.2	13,56165	1,986052	2,050181	-0,44405	2,451125	-0,72415	-8,62448	-2,01493	12,29146	0,561187	-3,10797	-1,96129	6,20439	0,316127	-0,24841	3,463394	-3,75795	-2,26335	-4,24164	-5,97455	7,627263	5,965305	-0,71341	8,373778
WS1.3	0,175741	1,892624	3,95885	-0,87306	-0,91149	-1,45492	2,839237	-2,40978	0,79994	0,746547	2,075618	-6,72352	-2,67483	-0,28077	-0,6857	-0,01406	-5,58157	4,929582	3,162556	-3,89375	-0,41043	2,441014	-0,13091	0,220261
WS1.4	-0,01696	-2,11713	0,194501	3,378128	-0,67143	-2,62582	-0,44568	1,404401	3,232606	0,289955	-2,70214	-3,5812	0,030882	2,40078	-4,43346	-3,8496	-3,35517	-0,4578	-0,19858	-5,39971	4,349033	-1,83524	2,935869	3,070384
WS1.5	-0,00573	-0,00631	-0,00161	-0,01095	-0,00215	-0,00193	-0,01586	0,004886	0,024008	-0,00773	-0,01451	0,033172	1,663337	0,00398	0,00568	0,037751	-0,00966	-0,00449	0,007103	0,018662	-0,00794	0,006457	-0,00452	-0,00266
WS1.6	-7,52302	8,42136	2,336977	6,219779	-3,3161	0,747476	-1,76511	2,68631	7,049602	-0,6412	2,047473	0,057278	-4,5303	-0,72728	6,286509	-4,27129	-3,11301	3,757156	3,050321	3,76861	0,248826	-10,1205	-2,98538	3,628674
WS1.7	0,485727	-0,28229	-0,05502	-0,39222	-0,09666	0,049519	-1,75886	-2,57922	-0,47784	-0,58342	-12,3136	0,193904	0,14134	-5,90497	0,052874	0,008025	-1,28325	0,217313	-0,17515	0,302318	0,437365	-1,3056	0,088098	0,251811
WS1.8	-1,0777	-0,01306	-1,49489	0,68417	-0,09543	-0,26689	-1,50451	-0,53623	2,747956	0,427976	-0,8823	-0,40567	-0,28013	0,009698	-1,56617	-1,97941	-0,99532	0,3066	-0,36465	-1,52666	1,74259	-0,33054	-0,91064	1,480538
WS1.9	0,351949	-0,02226	-0,33445	-0,19987	0,028966	-0,39008	-0,34693	0,405272	0,295499	0,292844	-0,01641	0,071472	0,027391	0,033208	-0,25172	-0,04833	0,135235	0,33262	-0,06183	0,654949	0,011379	0,386719	-0,12526	-0,4525
WS1.10	2,018643	-0,48815	2,866315	-3,97597	-0,09397	-0,68921	1,963611	-0,27326	-8,87854	0,097008	6,030674	2,790824	5,958155	-0,51478	3,299115	-1,58502	0,803525	0,319192	2,030283	2,251686	1,305321	-15,0293	3,410821	-3,00383
WS1.11	-1,37504	-0,38514	0,517041	0,348569	-1,19886	-7,05371	0,091862	-1,37661	1,392842	0,785744	0,435618	-1,7075	0,581562	-0,85539	0,04848	0,576688	0,401892	0,217254	0,330675	2,88743	-5,20728	-1,41502	-2,15646	-1,2121
WS1.12	-7,97709	-0,04637	0,00743	0,207503	-0,04054	0,070352	0,294178	0,363997	-0,3028	-0,04905	-0,35381	0,104997	-0,27033	-0,03734	-0,07235	-0,37422	-0,05903	-0,27419	0,10496	0,051436	-0,18629	0,041498	0,176376	-0,01305
WS1.13	-3,46525	1,774281	-2,03666	-4,2727	0,736519	-1,71046	-4,88154	-0,09158	-4,68128	-1,07615	3,938769	8,173663	-8,6406	-0,604	-3,15575	-7,31762	5,095257	-7,77627	-5,63711	7,676712	1,353183	-5,8015	-1,8306	2,074651
WS1.14	0,010443	-0,01931	0,001657	-0,0076	0,015133	0,287872	-0,00292	0,017312	0,019752	-0,00402	-0,00085	-0,00356	-0,00089	-0,00061	0,004566	0,005988	-0,00007	0,00382	-0,00836	0,001816	-0,00364	0,005907	-0,00969	-0,01007
WS1.15	-0,00221	0,001336	-0,00558	0,002583	0,315806	-0,00096	0,006467	0,014597	0,010774	0,013976	0,009116	0,013464	-0,00359	-0,00011	-0,002	0,023337	-0,00447	-0,03301	0,01001	0,003791	0,015097	0,006157	0,005699	0,023667
WS1.16	0,322059	-0,30381	-0,59118	0,246169	0,027867	0,515491	-0,55144	-0,34865	4,60065	0,092399	0,161387	-0,22958	-0,02762	0,024257	-0,35219	0,05833	-0,43167	-0,10329	-0,1076	-0,19483	-0,29073	8,855939	0,07158	0,40492
WS1.17	-3,74157	-4,94587	-3,92181	-2,6731	1,975468	2,264232	3,74003	7,23045	-3,54089	0,971212	1,740964	-3,6882	-1,09082	-0,31611	-3,73731	2,573812	-4,68762	-0,39267	-0,42392	-0,16174	8,47418	-10,3571	4,298779	-2,50967
WS1.18	5,331901	4,896482	1,745588	0,123581	-1,38917	0,481563	-1,7317	-4,76394	1,91831	-2,15539	-6,85438	2,980676	2,32746	0,998608	-0,11526	-4,5679	5,57422	3,536413	3,47717	5,198653	-6,12514	0,767712	-4,16043	1,551724
WS1.19	2,596129	2,23193	6,950613	2,241174	-1,36296	1,361631	-1,74274	-1,2147	-5,55183	-0,71349	-0,46063	-1,07367	0,573439	0,496029	-0,93281	1,684609	-1,98248	-1,64489	-0,23806	-0,11877	3,415418	0,289734	3,199262	0,387
WS1.20	1,474684	-0,54669	3,162715	-3,54584	1,086159	3,547168	0,723386	2,261546	-5,88017	0,28313	8,416905	-0,35884	-0,11041	-0,95574	-1,81453	6,367995	0,79706	0,747438	3,48039	2,979586	2,149865	-1,10251	1,465812	-2,15546
WS1.21	13,84995	0,552449	-3,80496	1,583097	1,326831	0,22958	4,162621	-0,4695	-6,57805	-0,46898	1,960906	5,618173	8,072972	-0,1687	-2,43404	8,132027	4,900722	0,41862	-0,50854	3,511741	-4,66346	-1,65656	-0,52658	-4,0119
WS1.22	-0,14947	-0,7112	0,411966	0,080366	-0,82187	-0,08471	1,079892	0,374155	0,074001	-9,55571	-0,20762	0,27621	0,022456	-0,03171	0,21988	0,480019	0,579945	-0,08846	0,20105	-0,30199	-0,07074	-0,51196	-0,05832	0,917712
WS1.23	-0,119	-0,00392	-0,11551	-0,00424	-0,11694	-0,12292	0,121444	0,055178	-0,08931	-0,00816	-0,12075	-0,04064	0,018601	0,022685	-6,38301	-0,13629	-0,01157	0,104144	0,095513	-0,20045	0,004855	0,012883	-0,00808	-0,01162
WS1.24	0,00346	0,365117	0,005322	0,003475	0,006626	-0,01969	0,0157	-0,0165	-0,00583	-0,00316	0,008164	-0,00159	-0,00012	-0,00016	0,008461	-0,00965	-0,0072	0,00127	0,00157	0,004855	0,012883	-0,00808	-0,01162	-0,01436
WS1.25	0,435458	1,134073	1,387113	0,133641	-0,19971	1,996702	-4,61346	-1,73089	-1,92654	0,372366	0,247703	0,968777	-0,41827	0,218695	0,355784	-0,04635	-2,95288	-0,5218	0,167289	-1,65936	3,132575	-0,35817	1,602983	0,739974
WS1.26	-1,76164	0,384092	-1,75126	-0,57457	-2,08434	-2,56612	2,49775	1,651796	1,122556	-0,20291	-0,86877	-0,05126	-0,78249	-0,22778	1,578268	2,613276	-6,00482	2,613069	2,759928	2,845404	1,120316	-1,77412	0,693851	1,120214
WS1.27	-1,17745	0,662943	0,048189	0,940729	0,176289	-0,07382	0,035803	5,910898	1,177463	1,362953	29,03324	-0,57712	0,35355	9,546648	-0,15841	-0,05655	3,074201	-0,52147	0,501659	-0,7362	-1,08778	3,522406	-0,16483	-0,60096
WS1.28	1,567983	0,279991	-3,78953	0,035523	1,747758	-2,26905	-0,71893	-0,71813	2,068017	0,146762	1,552516	1,970537	-0,2072	-0,45457	-0,52833	-1,8874	-0,25436	0,849747	0,121626	1,795291	0,321072	-3,06068	-1,50151	1,130888
WS1.29	-9,94345	0,274639	-0,22554	0,45787	-0,13463	0,12465	2,5206	3,335479	1,10131	0,998174	22,2667	-1,00845	-0,47897	1,295324	-0,15341	0,014956	2,484808	-0,49404	0,730612	-0,96672	2,769512	-0,62807	-0,03254	-0,28429
WS1.30	1,853053	-3,42192	0,505854	-2,09718	-0,06835	-8,9135	3,787527	-1,60949	-6,79538	0,910666	10,4985	-3,95921	4,232977	-1,54398	-5,62924	-2,60947	-3,02374	0,127822	-1,65564	-2,00753	-4,00841	-11,3828	-0,95973	-4,69703
WS1.31	-10,5105	-0,57177	0,261661	-0,67758	0,002644	-0,06617	0,921854	0,259398	0,049583	-0,747059	0,16273	0,245705	0,017002	-0,02333	0,374918	0,423658	-0,07828	0,178307	-0,27873	0,374918	0,423658	-0,07828	-0,4336	-0,07492
WS1.32	-10,2673	-1,57947	-1,18508	0,189003	-0,34743	1,890003	-0,73558	1,795456	2,285262	-0,51565	-3,84959	0,061088	7,063377	0,449448	-1,82246	1,732444	-0,12761	-0,70178	0,580371	1,949453	1,214163	0,74942	0,521162	2,646806
WS1.33	-0,16293	0,482055	-0,546722	0,210831	0,337689	-0,75723	-0,2658	0,47197	-0,31135	-0,03586	-0,51486	0,026937	0,027404	0,138185	-0,03094	-1,2376	3,815442	0,162686	-1,20561	-0,04306	-1,34682	-0,98953	0,51111	
Bias	-1,23166	0,073834	-0,48258	-0,50416	-0,48888	-0,04034	0,800482	0,05996	-0,45835	-0,36405	-0,52479	0,719518	-0,56953	-0,02379	0,562362	0,406477	-0,51161	-0,08251	0,500009	0,684707	0,225797	-0,60191	0,348797	0,578223

4.3.5. ETAPA DE FINALIZAÇÃO

A etapa de finalização do ciclo de projeto é fundamentada nas definições da etapa de avaliação e tem como objetivo apresentar o método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Dessa forma, a partir das definições da etapa de avaliação, pode-se apresentar a ferramenta completa de processamento das informações, fundamentada na expressão (6) e ilustrada pela Figura 32. Nessa figura, observa-se que as entradas (1 a 16) são ponderadas pelos pesos (W_e e B_e) dos neurônios da camada escondida e combinadas pelos pesos (W_s e B_s) dos neurônios da camada de saída, para calcular as saídas (1 a 24). Isso atende o objetivo específico desta tese, no sentido de adaptar a ferramenta para definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*, indicando para as empresas quais tecnologias elas devem priorizar.

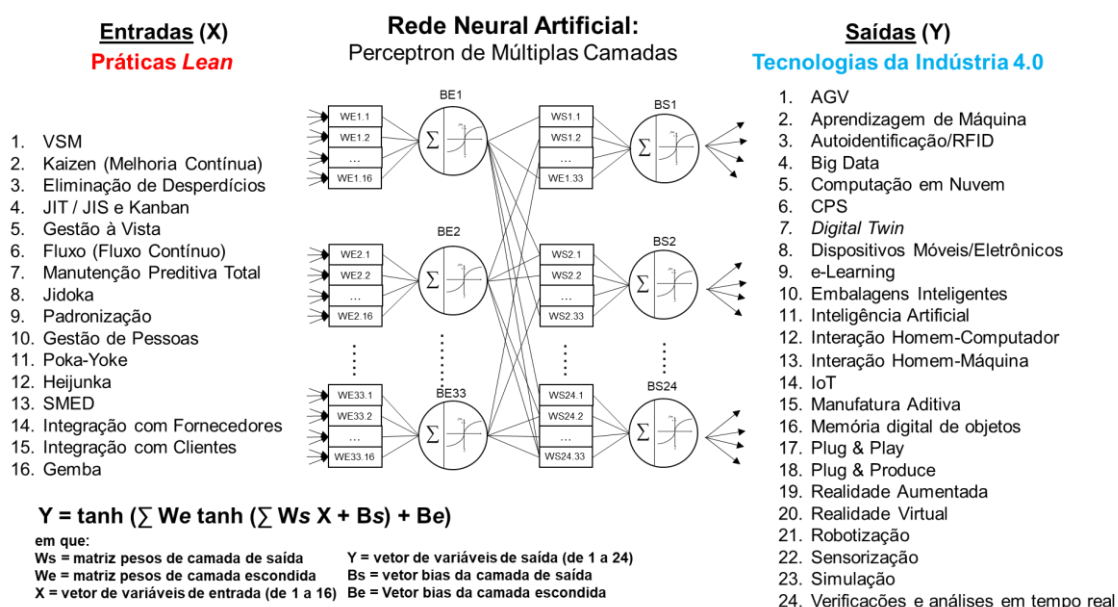


Figura 32 – Ferramenta de processamento das informações

Com isso, a ferramenta de processamento das informações atende aos requisitos e critérios de aceitação definidos nas Seções 4.1.3 e 4.1.4,

respectivamente, pois atribui graus de maturidade as práticas *Lean*, relaciona as práticas *Lean* com as tecnologias da Indústria 4.0, atribui pontuações às tecnologias da Indústria 4.0, a partir dos graus de maturidade das práticas *Lean*, indicando quais tecnologias podem ser priorizadas e tem um erro que não impacta negativamente a proposta do modelo.

Assim, mediante o material desenvolvido, ao longo das etapas do ciclo de projeto, apresenta-se o método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean* e a integração dessa informação à ferramenta de processamento das informações, apresentada pela expressão (6), na Seção 4.3.3.1 e ilustrada na Figura 32.

A partir disso, existem duas possibilidades para a aplicação do método, apresentadas na Figura 33.

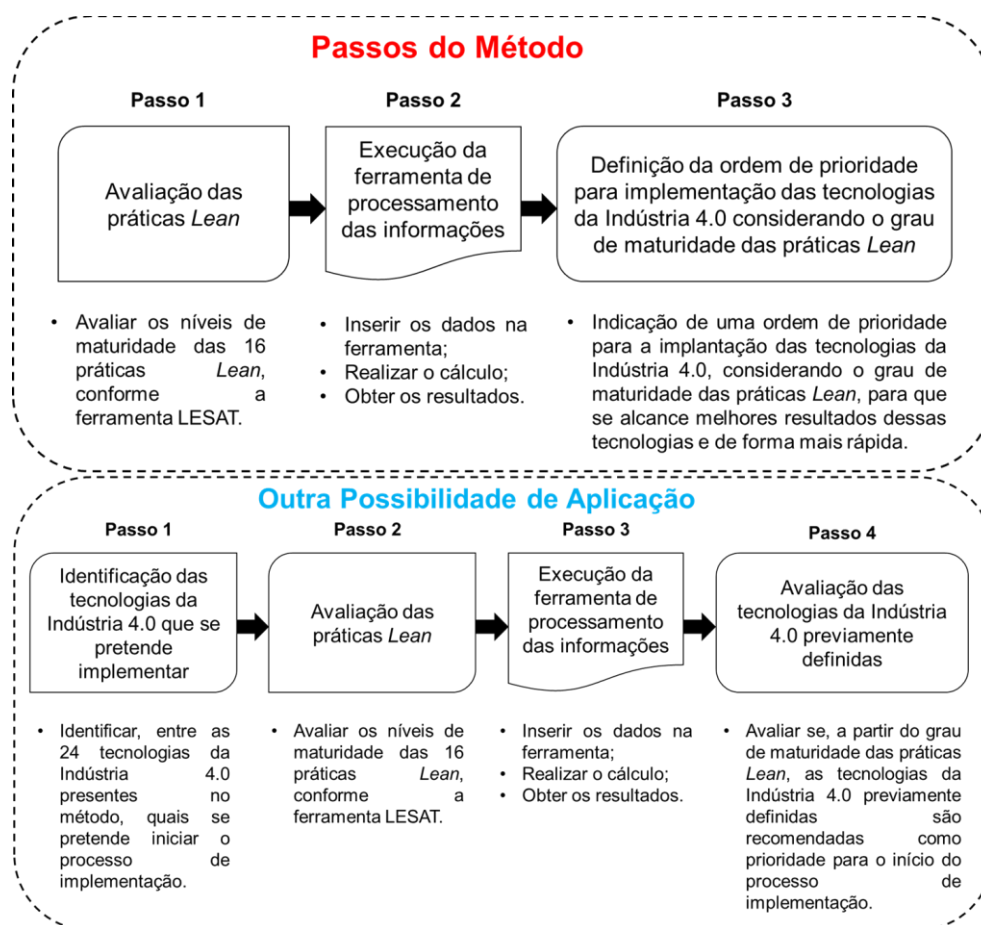


Figura 33 – Passos para a aplicação do método

Na primeira possibilidade, a empresa pretende iniciar a implementação da Indústria 4.0, porém não sabe ao certo quais tecnologias devem ser priorizadas. Dessa forma, sugere-se a implementação, seguindo três passos:

- Apresenta/avalia o nível de maturidade das práticas *Lean*, identificadas no método, por meio da ferramenta LESAT (a partir das práticas da LESAT identificadas no Quadro 22).
- Insere os dados na ferramenta para a realização do cálculo e apresentação dos resultados.
- Identifica uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Na segunda possibilidade, a empresa tem ciência de quais tecnologias da Indústria 4.0 pretende implementar. Dessa forma, sugere-se a implementação, seguindo quatro passos:

- Identificar quais tecnologias da Indústria 4.0 pretende-se iniciar o processo de implementação, a partir das 24 tecnologias apresentadas no método.
- Apresenta/avalia o nível de maturidade das práticas *Lean*, identificadas no método, por meio da ferramenta LESAT (a partir das práticas da LESAT identificadas no Quadro 22).
- Insere os dados na ferramenta para a realização do cálculo e apresentação dos resultados.
- Avalia se, a partir do grau de maturidade das práticas *Lean*, as tecnologias da Indústria 4.0 previamente definidas são recomendadas como prioridade para o início do processo de implementação.

5. APLICAÇÕES DE ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Para avaliar a aplicabilidade do método, foram realizadas aplicações de ilustração, em empresas de manufatura de diferentes segmentos. As aplicações foram realizadas em duas etapas, em empresas do conhecimento do pesquisador, e que se mostraram disponíveis e com interesse no tema. Na primeira, após o contato telefônico prévio, foram enviados aos participantes, via e-mail, carta de apresentação com o objetivo do trabalho e das aplicações de Ilustração (Apêndice A), quadro explicativo sobre as tecnologias da Indústria 4.0 (Quadro 1), quadros explicativos apresentando as relações entre determinadas práticas *Lean* e determinadas tecnologias da Indústria 4.0 com respectivos benefícios (Quadros 24 ao 39), e formulários para a avaliação de maturidade *Lean* (Quadro 22). Na segunda etapa foram realizadas reuniões via Microsoft *Teams* para *i)* discussão e esclarecimentos sobre as informações enviadas previamente, *ii)* avaliação do grau de maturidade *Lean* da empresa e *iii)* apresentação dos resultados. Para as empresas 1, 2 e 3 foram necessárias 4 reuniões e para a empresa 4 foram necessárias 5 reuniões.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS EMPRESAS

A primeira empresa selecionada é uma fabricante de tratores (neste trabalho denominada como “Empresa 1”), com aplicação nos ramos de construção, mineração, pavimentação e agronegócio. Situada no estado de São Paulo, conta com 4200 colaboradores, fornecendo produtos para a América Latina, América do Norte, Oriente Médio e Europa, e possui um portfólio composto por seis modelos de máquinas. Nessa empresa foram entrevistados dois gerentes, sendo um deles responsável pelo desdobramento no *Lean* em toda a empresa e o outro responsável pelo planejamento avançado de manufatura, sendo um dos tópicos as inovações tecnológicas.

A segunda empresa selecionada é uma fabricante de grupos geradores de energia elétrica (neste trabalho denominada como “Empresa 2”), com potências que variam de 45KVa a 9200KVa, com diversas áreas de aplicação como, por exemplo, condomínios residenciais, *shopping centers*, telecomunicações, hospitais, *data centers* e plataformas de petróleo. Situada no estado de São Paulo, conta com 128 colaboradores e fornece produtos para a América Latina e América do Norte. Nessa empresa, foram entrevistados os dois gerentes, em que um deles é responsável pelo desdobramento das ferramentas estratégicas, sendo uma delas o *Lean* e o outro responsável pela engenharia de manufatura e planejamento para novas tecnologias.

A terceira empresa selecionada é uma fabricante de motores (neste trabalho denominada como “Empresa 3”), destinados a aplicações em grupos geradores, máquinas agrícolas, embarcações marítimas, tratores de construção e pavimentação e diversos segmentos industriais. Situada no estado do Paraná, conta com 152 colaboradores e fornece produtos para a América Latina, América do Norte e Europa. Nessa empresa, foram entrevistados o gerente responsável pelo desdobramento do *Lean* e o diretor de operações, que possui como uma de suas atribuições o investimento em novas tecnologias.

Por fim, a quarta empresa selecionada é responsável por fabricar e fornecer serviços de manutenções em locomotivas, vagões, vias, fixadores, sinalizações e trilhos (neste trabalho denominada como “Empresa 4”). Situada no estado de Minas Gerais, conta com 53 colaboradores, fornece e repara produtos e serviços para os países da América do Sul. Nessa empresa, foi entrevistado o gerente de operações, responsável tanto pelo desdobramento do *Lean* quanto pelo investimento em novas tecnologias.

5.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados das aplicações de ilustração, realizadas nas quatro empresas selecionadas.


5.2.1. APLICAÇÃO NA EMPRESA 1

O processo de aplicação do método, na Empresa 1, ocorreu por meio de teleconferências, distribuídas em quatro dias, de aproximadamente duas horas por dia, realizadas em dezembro de 2021. Na primeira etapa do processo, foi realizada uma explanação sobre as tecnologias da Indústria 4.0, presentes no método e as interações e benefícios das práticas *Lean* com essas tecnologias. Na segunda etapa foi aplicado o método de avaliação da maturidade do *Lean* e na terceira etapa foi realizada uma discussão com os entrevistados sobre as tecnologias indicadas como prioridade, resgatando os possíveis benefícios que as empresas poderiam alcançar, caso priorizassem a implementação dessas tecnologias. Discutiu-se também quais outras tecnologias poderiam ser priorizadas, a partir da melhoria de determinadas práticas *Lean*. Assim, após a aplicação do método, foram encontrados os resultados apresentados na Figura 34.

Na avaliação da maturidade do *Lean*, realizada pelos entrevistados da primeira empresa (fabricante de tratores), nota-se que o VSM, o JIT/JIS/Kanban e a Manutenção Produtiva Total, destacaram-se como as práticas que apresentaram os maiores níveis de maturidade. Já a Gestão à Vista, a Padronização e o SMED, foram as práticas com os menores resultados. As demais práticas alcançaram o nível 3, o que indica que também estariam aptas para servir como apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

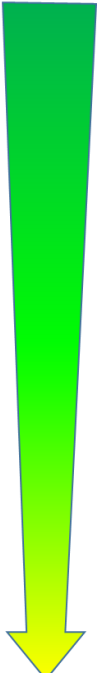
A partir desses resultados, pode-se identificar que as tecnologias Verificações e Análises em Tempo Real, Aprendizagem de Máquina, Manufatura Aditiva, AGV, Computação em Nuvem, *Digital Twin*, Embalagens Inteligentes, Memória Digital de Objetos, Realidade Virtual e Robotização, apresentaram os melhores resultados, de forma que poderiam ter suas implementações priorizadas (Figura 35).

Resultados - Maturidade das Práticas Lean		Nível
1	VSM	4
2	Kaizen (Melhoria Contínua)	3
3	Eliminação de Desperdícios	3
4	JIT/JIS e Kanban	5
5	Gestão à Vista	2
6	Fluxo (Fluxo Contínuo)	3
7	Manutenção Produtiva Total	4
8	Jidoka	3
9	Padronização	2
10	Gestão de Pessoas	3
11	Poka-Yoke	3
12	Heijunka	3
13	SMED	2
14	Integração com Fornecedores	3
15	Integração com Clientes	3
16	Gemba	3



Resultados - Priorização para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.0		Nível
1	Verificações e análises em tempo real	4
2	Big Data	3
3	Aprendizagem de Máquina	4
4	Inteligência Artificial	3
5	CPS	3
6	IoT	3
7	Manufatura Aditiva	4
8	AGV	4
9	Autoidentificação (RFID)	3
10	Computação em Nuvem	4
11	Digital Twin	4
12	Dispositivos Móveis/Eletrônicos	3
13	e-Learning	3
14	Embalagens Inteligentes	5
15	Interação Homem-Computador	2
16	Interação Homem-Máquina	3
17	Memória digital de objetos	4
18	Plug & Play	2
19	Plug & Produce	2
20	Realidade Aumentada	3
21	Realidade Virtual	4
22	Robotização	4
23	Sensorização	3
24	Simulação	3

Figura 34 – Avaliação da Maturidade do *Lean* e Priorização das Tecnologias da Indústria 4.0: Fabricante de Tratores



Ordem de Prioridade para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.0	Nível
Embalagens Inteligentes	5
Verificações e análises em tempo real	4
Aprendizagem de Máquina	
Manufatura Aditiva	
AGV	
Computação em Nuvem	
Digital Twin	
Memória digital de objetos	
Realidade Virtual	
Robotização	3
Big Data	
Inteligência Artificial	
CPS	
IoT	
Autoidentificação (RFID)	
Dispositivos Móveis/Eletrônicos	
e-Learning	
Realidade Aumentada	
Sensorização	
Simulação	2
Interação Homem-Máquina	
Interação Homem-Computador	
Plug & Play	2
Plug & Produce	

Figura 35 – Ordem de prioridade para a implementação das Tecnologias da Indústria 4.0: Fabricante de Tratores

Com relação às Verificações e Análises em Tempo Real, observa-se que as práticas VSM e Gestão de Pessoas são as que melhor podem apoiar a implementação dessas tecnologias e, nessa empresa, apresentaram níveis de maturidade 3 e 4. Já a implementação da Aprendizagem de Máquina pode ser apoiada pelas práticas VSM, Melhoria Contínua, JIT/JIS/Kanban, TPM e Poka-Yoke. Todas essas práticas alcançaram uma boa avaliação, com destaque para o VSM, JIT/JIS/Kanban e TPM. A Manufatura Aditiva também alcançou um bom nível referente à priorização para implementação, devido aos níveis de maturidade das práticas Eliminação de Desperdícios, JIT/JIS/Kanban e Integração com Clientes. Já a alta prioridade dos AGVs deve-se aos resultados das práticas Eliminação de Desperdícios, JIT/JIS/Kanban e Poka-Yoke. Quanto a Computação em Nuvem, as práticas VSM, Eliminação de Desperdícios, Melhoria Contínua, JIT/JIS/Kanban, TPM, Poka-Yoke e Integração com Fornecedores, alcançaram níveis de maturidade, que apoiam a priorização dessa tecnologia. A *Digital Twin*, por sua vez, conta com o apoio das práticas Eliminação de Desperdícios e JIT/JIS/Kanban, para a sua priorização. Já as Embalagens Inteligentes podem ser priorizadas, devido ao nível de maturidade da prática JIT/JIS/Kanban. Com relação a Memória Digital de Objetos, nota-se que o JIT/JIS/Kanban e o Poka-Yoke podem apoiar a implementação dessa tecnologia. A recomendação de prioridade para a implementação da Realidade Virtual está relacionada com a maturidade das práticas VSM, TPM, Heijunka e Gemba. Por fim, a Robotização também foi identificada como uma possível prioridade, devido ao nível de maturidade das práticas JIT/JIS/Kanban e Jidoka.

Por meio dessa avaliação pode-se observar que os níveis de maturidade das práticas VSM e JIT/JIS/Kanban, permitiram que muitas tecnologias da Indústria 4.0 tivessem suas implementações priorizadas. Essa análise corrobora com os benefícios das interações dessas práticas, apresentadas nos Quadros 25 e 28.

Para os entrevistados, a aplicação do método permitiu observar que o nível elevado de maturidade da prática JIT/JIS/Kanban, facilita a implementação da tecnologia “Embalagens Inteligentes”, indicando as áreas corretas para implementação. Pôde-se observar que as práticas JIT/JIS/Kanban e Jidoka

auxiliam na seleção e preparo dos processos logísticos, para a implementação da Robotização, apoiando os operadores na movimentação e manuseio de materiais pesados. Para eles, a identificação das interações entre as práticas *Lean* e as novas tendências tecnológicas, facilita o entendimento sobre os possíveis benefícios que as empresas podem alcançar em suas operações. O método apoia o desenvolvimento de planos de implementação baseados na seleção de tecnologias que podem alcançar melhores resultados ou nas melhorias das práticas *Lean* para apoiar a implementação de determinadas tecnologias. Por fim, comentam que a LESAT é uma ferramenta abrangente, porém de fácil aplicação


5.2.2. APLICAÇÃO NA EMPRESA 2

O processo de aplicação do método, na Empresa 2, também ocorreu por meio de teleconferências, distribuídas em 4 dias, de aproximadamente duas horas e trinta minutos por dia, realizadas em dezembro de 2021. As etapas de aplicação do método foram as mesmas descritas na Empresa 1. Assim, após a aplicação do método, foram encontrados os resultados apresentados na Figura 36.

Na avaliação da maturidade do *Lean*, realizada pelos entrevistados, observa-se que as práticas Poka-Yoke e Heijunka, destacaram-se como as que apresentaram os maiores níveis de maturidade. Já a Melhoria Contínua, Gestão à Vista, TPM, Jidoka, Gestão de Pessoas, SMED e Integração com Clientes, foram as práticas com os menores resultados. As demais práticas alcançaram o nível 3, o que indica que também estariam aptas para servir como apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

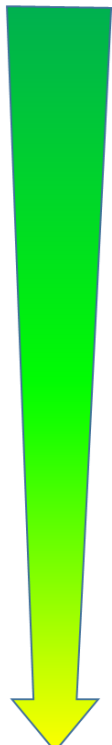
A partir desses resultados, pode-se identificar que as tecnologias, Inteligência Artificial, AGV e Memória Digital de Objetos apresentaram os melhores resultados, de forma que poderiam ter suas implementações priorizadas (Figura 37).

Resultados - Maturidade das Práticas Lean		Nível
1	VSM	3
2	Kaizen (Melhoria Contínua)	2
3	Eliminação de Desperdícios	3
4	JIT/JIS e Kanban	3
5	Gestão à Vista	2
6	Fluxo (Fluxo Contínuo)	3
7	Manutenção Produtiva Total	2
8	Jidoka	2
9	Padronização	3
10	Gestão de Pessoas	2
11	Poka-Yoke	5
12	Heijunka	4
13	SMED	2
14	Integração com Fornecedores	3
15	Integração com Clientes	2
16	Gemba	3



Resultados - Priorização para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.0		Nível
1	Verificações e análises em tempo real	3
2	Big Data	3
3	Aprendizagem de Máquina	3
4	Inteligência Artificial	4
5	CPS	3
6	IoT	3
7	Manufatura Aditiva	3
8	AGV	4
9	Autoidentificação (RFID)	3
10	Computação em Nuvem	3
11	Digital Twin	3
12	Dispositivos Móveis/Eletrônicos	2
13	e-Learning	2
14	Embalagens Inteligentes	3
15	Interação Homem-Computador	2
16	Interação Homem-Máquina	2
17	Memória digital de objetos	4
18	Plug & Play	3
19	Plug & Produce	2
20	Realidade Aumentada	3
21	Realidade Virtual	3
22	Robotização	3
23	Sensorização	3
24	Simulação	3

Figura 36 – Avaliação da Maturidade do *Lean* e Priorização das Tecnologias da Indústria 4.0: Fabricante de Grupos Geradores



Ordem de Prioridade para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.1	Nível
Inteligência Artificial AGV Memória digital de objetos	4
Verificações e análises em tempo real Big Data Aprendizagem de Máquina CPS IoT Manufatura Aditiva Autoidentificação (RFID) Computação em Nuvem Digital Twin Embalagens Inteligentes Plug & Play Realidade Aumentada Realidade Virtual Robotização Sensorização Simulação	3
Dispositivos Móveis/Eletrônicos e-Learning Interação Homem-Computador Interação Homem-Máquina Plug & Produce	2

Figura 37 – Ordem de prioridade para a implementação das Tecnologias da Indústria 4.0: Fabricante de Grupos Geradores

Com relação Inteligência Artificial, verifica-se que o Heijunka pode apoiar a implementação dessa tecnologia e, na empresa avaliada, essa prática alcançou o nível 4 de maturidade. Quanto a possível priorização do AGV, deve-se aos bons níveis de maturidade da Eliminação de Desperdícios, do JIT/JIS/Kanban e da Poka-Yoke. Por fim, a Memória Digital de Objetos também foi identificada com uma possível tecnologia a ser priorizada, principalmente pelos resultados de maturidade das práticas JIT/JIS/Kanban e Poka-Yoke.


Com o apoio dessa avaliação pode-se observar que os níveis de maturidade das práticas Heijunka, JIT/JIS/Kanban e Poka-Yoke, permitiram que praticamente as três tecnologias citadas pudessem ser consideradas como possíveis prioridades. Mais uma vez, esse resultado confirma os possíveis benefícios entre essas práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0, conforme indicado nos Quadros 28, 35 e 36.

Segundo os entrevistados, os resultados apresentados pelo método serviram como alerta para a empresa, sobre a necessidade de possíveis melhorias no *Lean*, antes da implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Eles concordam que as interações entre práticas Lean e tecnologias da Indústria 4.0 devem ser incluídas no planejamento de implementação de novas tecnologias da empresa

5.2.3. APLICAÇÃO NA EMPRESA 3

O processo de aplicação do método, na Empresa 3, também ocorreu por meio de teleconferências, distribuídas em quatro dias, de aproximadamente duas horas por dia, realizadas em janeiro de 2022. As etapas de aplicação do método também foram as mesmas descritas na Empresa 1. Assim, após a aplicação do método, foram encontrados os resultados apresentados na Figura 38.

Resultados - Maturidade das Práticas Lean		Nível
1	VSM	3
2	Kaizen (Melhoria Contínua)	3
3	Eliminação de Desperdícios	4
4	JIT/JIS e Kanban	3
5	Gestão à Vista	3
6	Fluxo (Fluxo Contínuo)	3
7	Manutenção Produtiva Total	4
8	Jidoka	2
9	Padronização	4
10	Gestão de Pessoas	3
11	Poka-Yoke	4
12	Heijunka	4
13	SMED	3
14	Integração com Fornecedores	2
15	Integração com Clientes	3
16	Gemba	3

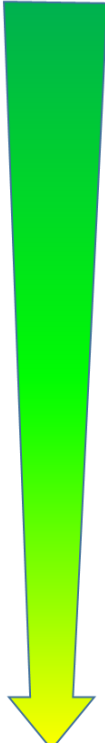


Resultados - Priorização para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.0		Nível
1	Verificações e análises em tempo real	3
2	Big Data	3
3	Aprendizagem de Máquina	3
4	Inteligência Artificial	4
5	CPS	3
6	IoT	3
7	Manufatura Aditiva	3
8	AGV	4
9	Autoidentificação (RFID)	3
10	Computação em Nuvem	3
11	Digital Twin	4
12	Dispositivos Móveis/Eletrônicos	3
13	e-Learning	3
14	Embalagens Inteligentes	3
15	Interação Homem-Computador	3
16	Interação Homem-Máquina	3
17	Memória digital de objetos	4
18	Plug & Play	4
19	Plug & Produce	3
20	Realidade Aumentada	4
21	Realidade Virtual	4
22	Robotização	3
23	Sensorização	4
24	Simulação	3

Figura 38 – Avaliação da Maturidade do *Lean* e Priorização das Tecnologias da Indústria 4.0: Fabricante de Motores

Na avaliação da maturidade do *Lean*, realizada pelos entrevistados, observa-se que as práticas Eliminação de Desperdícios, TPM, Padronização, Poka-Yoke e Heijunka, destacaram-se como as que apresentaram os maiores níveis de maturidade. Já o Jidoka e a Integração com Fornecedores, foram as práticas com os menores resultados. As demais práticas alcançaram o nível 3, o que indica que também estariam aptas para servir como apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

A partir desses resultados, pode-se identificar que as tecnologias Inteligência Artificial, AGV, *Digital Twin*, Memória Digital de Objetos, Plug & Play, Realidade Aumentada, Realidade Virtual e Sensorização apresentaram os melhores resultados, de forma que poderiam ter suas implementações priorizadas (Figura 39). As demais tecnologias alcançaram o nível 3, o que indica que também estariam aptas para serem priorizadas. Para esta empresa, especificamente, não houve tecnologias com priorização 1 ou 2, devido ao alto nível de maturidade do *Lean* em toda a organização.



Ordem de Prioridade para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.0	Nível
Inteligência Artificial AGV Digital Twin Memória digital de objetos Plug & Play Realidade Aumentada Realidade Virtual Sensorização	4
Verificações e análises em tempo real Big Data Aprendizagem de Máquina CPS IoT Manufatura Aditiva Autoidentificação (RFID) Computação em Nuvem Dispositivos Móveis/Eletrônicos e-Learning Embalagens Inteligentes Interação Homem-Computador Interação Homem-Máquina Plug & Produce Robotização Simulação	3

Figura 39 – Ordem de prioridade para a implementação das Tecnologias da Indústria 4.0: Fabricante de Motores

Assim, com relação à Inteligência Artificial, nota-se que o Heijunka é a prática que pode auxiliar na implementação dessa tecnologia. Já para os AGV, as práticas que apoiam sua priorização são Eliminação de Desperdício, JIT/JIS/Kanban e Poka-Yoke. A *Digital Twin*, por sua vez, tem o apoio da Eliminação de Desperdício e do JIT/JIS/Kanban. Quanto a Memória Digital de Objetos, nota-se sua priorização é apoiada pelas práticas JIT/JIS/Kanban e Poka-Yoke. A tecnologia Plug & Play, pode ser apoiada pelas práticas Padronização e SMED, enquanto a Realidade Aumentada tem o apoio da Eliminação de Desperdício, Gestão à Vista, TPM, Gestão de Pessoas, Poka-Yoke e Gemba. Referente à Realidade Virtual, observa-se que as práticas VSM, TPM, Heijunka e Gemba podem apoiar sua implementação. Por fim, a Sensorização, pode ser apoiada pelas práticas Eliminação de Desperdício, TPM, Gestão de Pessoas, Heijunka e SMED.


Por meio dessa avaliação, pode-se observar que os níveis de maturidade de um conjunto de práticas *Lean* permitiram que praticamente todas as tecnologias citadas pudessem ser consideradas como possíveis prioridades, com destaque para as oito citadas anteriormente. Essa análise corrobora com os benefícios das interações entre as práticas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0, apresentadas na literatura, e descritas nos Quadros 26, 31, 33, 35 e 36. É importante ressaltar que essas interações não implicam que essas tecnologias poderão ser implementadas somente se elas ocorrerem, porém, conforme citado na literatura, as práticas *Lean* podem facilitar as implementações.

Na visão dos entrevistados, a aplicação do método permitiu observar que a prática JIT/JIS/Kanban auxilia no preparo do processo logístico para a implementação da tecnologia AGV de forma eficaz. A aplicação possibilitou, ainda, observar que a Poka-Yoke apoia no autoajuste dos AGVs, fazendo com que a tecnologia registre e envie informações sobre não conformidades, aos operadores e gestores da operação. Para eles, o método conduz a uma reflexão sobre a importância das práticas *Lean*, como uma filosofia de apoio as operações e ao plano de inovação tecnológica da empresa e representa um apoio importante para as empresas que pretendem iniciar o processo de implementação de novas tecnologias, porém apresentam dificuldades no desenvolvimento de um plano implementação. Por fim, comentam que a LESAT é uma ferramenta objetiva e de fácil aplicação.

5.2.4. APLICAÇÃO NA EMPRESA 4

O processo de aplicação do método, na Empresa 4, também ocorreu por meio de teleconferências, distribuídas em cinco dias, de aproximadamente duas horas por dia, realizadas em janeiro de 2022. As etapas de aplicação do método também foram as mesmas descritas na Empresa 1. Assim, após a aplicação do método, foram encontrados os resultados apresentados na Figura 40.

Resultados - Maturidade das Práticas Lean		Nível
1	VSM	2
2	Kaizen (Melhoria Contínua)	2
3	Eliminação de Desperdícios	3
4	JIT/JIS e Kanban	2
5	Gestão à Vista	2
6	Fluxo (Fluxo Contínuo)	3
7	Manutenção Produtiva Total	4
8	Jidoka	2
9	Padronização	4
10	Gestão de Pessoas	2
11	Poka-Yoke	3
12	Heijunka	4
13	SMED	4
14	Integração com Fomecedores	2
15	Integração com Clientes	2
16	Gemba	2

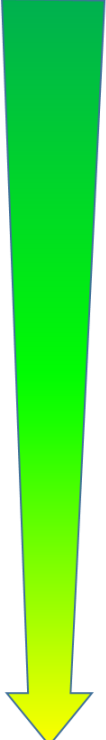


Resultados - Priorização para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.0		Nível
1	Verificações e análises em tempo real	2
2	Big Data	3
3	Aprendizagem de Máquina	3
4	Inteligência Artificial	4
5	CPS	3
6	IoT	3
7	Manufatura Aditiva	2
8	AGV	3
9	Autoidentificação (RFID)	2
10	Computação em Nuvem	3
11	Digital Twin	3
12	Dispositivos Móveis/Eletrônicos	2
13	e-Learning	2
14	Embalagens Inteligentes	2
15	Interação Homem-Computador	2
16	Interação Homem-Máquina	2
17	Memória digital de objetos	3
18	Plug & Play	4
19	Plug & Produce	4
20	Realidade Aumentada	3
21	Realidade Virtual	3
22	Robotização	2
23	Sensorização	3
24	Simulação	3

Figura 40 – Avaliação da Maturidade do *Lean* e Priorização das Tecnologias da Indústria 4.0: Fabricante de Locomotivas

Na avaliação da maturidade do *Lean*, realizada pelo entrevistado, observa-se que as práticas TPM, Padronização, Heijunka e SMED destacaram-se como as que apresentaram os maiores níveis de maturidade. Já a Eliminação de Desperdícios, Fluxo Contínuo e Poka-Yoke, alcançaram o nível 3, o que indica que também estariam aptas para servir como apoio na implementação das tecnologias da Indústria 4.0. As outras nove práticas *Lean* alcançaram o nível 2 de maturidade, sugerindo que a empresa ainda necessita de um processo de melhoria do próprio *Lean*, para que possa alcançar resultados melhores e mais rápidos em determinadas tecnologias da Indústria 4.0.

A partir desses resultados, pode-se identificar que as tecnologias Inteligência Artificial, Plug & Play e Plug & Produce apresentaram os melhores resultados, de forma que poderiam ter suas implementações priorizadas (Figura 41).



Ordem de Prioridade para Implementação das Tecnologias da Indústria 4.0	Nível
Inteligência Artificial Plug & Play Plug & Produce	4
Big Data Aprendizagem de Máquina CPS IoT AGV Computação em Nuvem Digital Twin Memória digital de objetos Realidade Aumentada Realidade Virtual Sensorização Simulação	3
Verificações e análises em tempo real Manufatura Aditiva Autoidentificação (RFID) Dispositivos Móveis/Eletrônicos e-Learning Embalagens Inteligentes Interação Homem-Computador Interação Homem-Máquina Robotização	2

Figura 41 – Ordem de prioridade para a implementação das Tecnologias da Indústria 4.0: Fabricante de Locomotivas

Com relação à Inteligência Artificial, verifica-se que, nessa empresa, o Heijunka é a principal prática que pode auxiliar na implementação dessa tecnologia. Já para a Plug & Play, tem-se a Padronização e o SMED como as práticas que podem apoiar a implementação dessa tecnologia. Por fim, a tecnologia Plug & Produce, pode ser apoiada pelo SMED. Com base nessa verificação, nota-se que, mais uma vez é possível corroborar esses resultados com as interações apresentadas na literatura e descritas nos Quadros 31, 33, 36 e 37.

Para o entrevistado, os resultados apresentados pelo método serviram como alerta para a empresa sobre a importância em avançar no desenvolvimento das práticas Lean, antes de iniciar a implementação de novas tecnologias.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como principal resultado deste trabalho, apresenta-se o método que permite definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*.

Verifica-se também que o método atende ao critério de aceitação, referente ao possível erro presente no modelo matemático, apresentando um erro de medição de 0,25, o qual não interfere na proposta de medição do método. Destaca-se ainda que o método apresenta também a característica de adaptabilidade, pois pode ser facilmente atualizado, perante o avanço da literatura e o surgimento de novas interações entre o *Lean* e a Indústria 4.0.

Outro resultado alcançado neste trabalho é a sistematização dos dados, quanto às relações e os benefícios relativos à implementação das tecnologias da Indústria 4.0, considerando o grau de maturidade do *Lean* (descritos nos Quadros 23 a 37), com o intuito de orientar as empresas de manufatura sobre a importância e necessidade de adoção das práticas da filosofia *Lean*, que podem servir como apoio para o processo de implementação das tecnologias da Indústria 4.0, de modo que essas tecnologias possam se beneficiar dessas práticas, alcançando resultados melhores e mais rápidos nas operações das empresas.

Nota-se também que o método indica para as empresas quais tecnologias da Indústria 4.0 devem ter a implementação priorizada, considerando áreas ou departamentos que apresentem práticas *Lean* com alto grau de maturidade, e permite identificar quais práticas *Lean* devem ser melhoradas, para que se alcance os resultados da implementação de determinadas tecnologias da Indústria 4.0 em sua integralidade.

Por meio das aplicações de ilustração, pôde-se avaliar como ocorre o processo de aplicação do método, o qual demonstrou ser de fácil execução. Houve também boa receptividade e baixa resistência por parte dos profissionais das

empresas que participaram do processo, principalmente pela familiaridade desses profissionais com a filosofia *Lean*. Pôde-se, ainda, identificar menor dificuldade para implementação das tecnologias habilitadoras onde o Lean apresenta maior grau de maturidade.

7. CONCLUSÕES

A implementação da Indústria 4.0 traz no seu bojo diversos benefícios para as empresas. Porém, ainda são escassas as evidências da sua implementação na prática o que torna o uso das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 tarefa complexa e ainda mais desafiadora sem uma abordagem padronizada.

O *Lean* vem sendo apontado como fator crítico de sucesso para a implementação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Pesquisas indicam que o sucesso na implementação da Indústria 4.0 está fortemente relacionado ao nível de maturidade *Lean*, e sugerem que as empresas podem obter os benefícios atribuídos, no menor tempo, ao estabelecerem um plano de implementação, priorizando as tecnologias vinculadas às práticas *Lean* com maior grau de maturidade. No entanto, até onde se pôde pesquisar, não foram encontrados, na literatura, métodos que estabeleçam essa priorização.

O objetivo desta tese foi propor um método que permita definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*. Para tanto, foram identificadas as interações entre práticas *Lean* e tecnologias da Indústria 4.0, os benefícios advindos, e utilizada uma Rede Neural Artificial para processamento dessas interações.

O método proposto mostrou-se adequado e de fácil aplicação, e a Rede Neural utilizada como ferramenta de processamento apresentou um erro de 0.25, não impactando negativamente a proposta. Fornece uma orientação estruturada para as empresas em sua jornada na implementação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 e é um dos primeiros métodos a apoiar empresas no desenvolvimento de um plano de implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade *Lean*.

Com as aplicações de ilustração, foi possível verificar que a implementação da Indústria 4.0, pode encontrar menor dificuldade onde o *Lean* apresenta maior grau de maturidade.

A aplicação do método conduz as empresas a uma reflexão sobre quais práticas *Lean* devem ser melhoradas, para que determinadas tecnologias, já pré-selecionadas, tragam resultados melhores e mais rápidos.

O método serve de guia para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 e pode servir de complemento ou apoio aos métodos ou ferramentas que eventualmente possam existir ou que possam surgir. Nota-se, ainda, que os benefícios do *Lean* ajudam a limitar os riscos de insucesso na implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

Pelo fato do *Lean* ser uma estratégia já bastante utilizada e consolidada, ao compreender as interações entre *Lean* e Indústria 4.0, as empresas poderão oferecer menos resistência à implantação das novas tecnologias.

O trabalho contribui para o desenvolvimento da teoria na medida em que identifica e reúne de forma abrangente e de maneira estruturada, as correlações entre as práticas *Lean* e tecnologias da Indústria 4.0, os benefícios do *Lean* para a Indústria 4.0 e da Indústria 4.0 para o *Lean*. Como contribuição prática, o método fornece uma abordagem padronizada para o desenvolvimento de um plano de implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

7.1. DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Como delimitação, observa-se que o método apenas sugere uma ordem de implementação das tecnologias da Indústria 4.0, a partir da maturidade das práticas *Lean*, não é impositivo. Nota-se também que, na medida em que o conhecimento sobre Indústria 4.0 avança, o método proposto deverá ser atualizado.

7.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Esta pesquisa apresenta algumas limitações. Uma delas é o fato de que os resultados da aplicação do método não são quantificáveis, ou seja, não fornece resultados sobre a eficácia obtida, seja em custo ou tempo, não fornece resultados sobre a eficácia obtida, seja em custo ou tempo. Outra é que o método não apresenta uma priorização entre tecnologias em situações em que mais de uma é indicada como prioridade para a implementação.

7.3. TRABALHOS FUTUROS

Considerando que este trabalho apresenta um método que define uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*, existem, a partir dele, oportunidades para trabalhos futuros. Citem-se entre elas:

- Identificação de interações e relações adicionais, conforme avançam as pesquisas, nos temas *Lean* e Indústria 4.0.
- A realização de análises em aplicações futuras, para identificar na prática os benefícios das interações entre o *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0.
- Inclusão de funcionalidades no método, para que priorize qual tecnologia deve ser implementada, no caso de mais de uma tecnologia ser identificada como potencial para a implementação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACATECH. “Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies, **Acatech**, 2020.

ALLADI, T.; CHAMOLA, V.; PARIZI, R. M.; CHOO, K. R. Blockchain Applications for Industry 4.0 and Industrial IoT: A Review. **IEEE Access**, vol. 7, pp. 176935 – 176951, 2019.

ANDERL, R. “Industrie 4.0 – technological approaches, use cases, and implementation”. **Automatisierungstechnik**, p.753-765, 2015.

ANOSIKEA, A.; ALAFROPATIS, K.; GARZA-REYES J.A.; ANIL KUMAR, A.; LUTHRA, S.; ROCHA-LONA, L. Lean manufacturing and internet of things – A synergetic or antagonist relationship? **Computers In Industry** 129, 2021.

BAGNI, G.; SAGAWA, J.K.; GODINHO FILHO, M. Sales and operations planning for new products: a parallel process? **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, 2021.

BAJIC, B.; RIKALOVIC, A.; SUZIC, N.; PIURI, V. Industry 4.0 Implementation Challenges and Opportunities: A Managerial Perspective. **IEEE Systems Journal**, vol. 15, no. 1, 2021.

BALAJI, V.; VENKUMAR, P.; SABITHA, M.S.; AMUTHAGUKA, D. DVSMS: dynamic value stream mapping solution by applying IIoT. **Sādhanā** 45, 38, 2020.

BARDIN, Lawrence. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 1979.

BASKARAN, S.M.; LAKSHMANAN, A.R. “A framework model for lean tools selection for improving material flow using fuzzy TOPSIS”. **International Journal of Productivity and Quality Management**, Vol. 27, No. 2, 2019.

BEHRENDT, A.; MÜLLER, N.; ODENWÄLDER, P.; SCHMITZ, C. “Industry 4.0 demystified - lean’s next level: Amid digital disruption, five principles can help companies find tangible value in Industry 4.0 solutions”. **McKinsey & Company**, 2017.

BELEKOUKIAS, I.; GARZA-REYES, J.A.; KUMAR, V. “The impact of lean methods and tools on the operational performance of manufacturing organisations”. **International Journal of Production Research**, 52(18), pp. 5346-5366, 2014.

BELHADI, A.; FATIMA EZZAHRA TOURIKI, F.E.; EL FEZAZI, S. Development of a Lean Assessment Tool for Small and Medium Sized-Enterprises. **Springer International Publishing AG**, 2018.

BELTRAN-MARTIN, I.; ROCA-PUIG, V.; ESCRIG-TENA, A.; BOU-LLUSAR, J. C. Human resource flexibility as a mediating variable between high performance work systems and performance. **Journal of Management**, 34(5), 1009–1044, 2008.

BETHA, A. Enterprise Integration for Value Creation in an Organization. In: Loureiro G., Curran R. (eds) **Complex Systems Concurrent Engineering**. Springer, London, 2007.

BEYNON-DAVIES, P.; LEDERMAN, R. "Making Sense of Visual Management Through Affordance Theory." **Production Planning & Control** 28 (2): 142–157, 2017.

BHASIN, S.; BURCHER, P. "Lean viewed as a philosophy", **Journal of Manufacturing Technology Management**, Vol. 17 No. 1, pp. 56-72, 2006.

BITKOM, E.V.; VDMA, E.V.; ZVEI, E.V. Implementation Strategy Industrie 4.0: **Report on the results of the Industrie 4.0 Platform**, 2015.

BORTOLOTTI, T.; BOSCARI, S.; DANESE, P. Successful lean implementation: Organizational culture and soft lean practices. **International Journal of Production Economics**, Volume 160, Pages 182-201, 2015.

BOSTON CONSULTING GROUP – BCG. Our Perspective on Industry 4.0. disponível em: [https:// https://www.bcg.com/pt-br/capabilities/manufacturing/industry-4.0](https://www.bcg.com/pt-br/capabilities/manufacturing/industry-4.0) (acessado em 02 de Fevereiro de 2022), BCG, 2022.

BRAH, S.A.; CHONG, W.K. "Relationship between total productive maintenance and performance", **International Journal of Production Research**, Vol. 42, No. 12, pp. 2383-2401, 2004.

BROSIG, C.; WESTNER, M.; STRAHRINGER, S. "Revisiting the Concept of IT Capabilities in the Era of Digitalization". **IEEE 22nd Conference on Business Informatics (CBI)**, 2020.

BRYMAN, A. **Research methods and organizational studies**. London: Unwin Hyman, 1989.

BUER, S.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, F. T. "The Link between Industrie 4.0 and Lean Manufacturing: Mapping Current Research and Establishing a Research Agenda." In: **International Journal of Production Research** 56(8), pp. 1-17, 2018.

BUSINESS AND PROFESSIONAL SERVICES CONSULTING – BDO. 2021 Industry 4.0 Survey. **BDO – USA**, 2021.

BUTT, J. A Conceptual Framework to Support Digital Transformation in Manufacturing Using an Integrated Business Process Management Approach. **Designs**, 2020a.

BUTT, J. A strategic roadmap for the manufacturing industry to implement industry 4.0. **Designs**, 2020b.

ÇAGDAS, V.; STUBKJÆR, E. Design research for cadastral systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 35, n. 1, p. 77-87, 2011.

CALARGE, F.A.; PEREIRA, F.H.; SATOLO, E.G.; DIAZ, L.E.C. "Evaluation of Lean Production System by using SAE J4000 standard: Case study in Brazilian and Spanish automotive component manufacturing organizations". **African Journal of Business Management** Vol. 6(49), pp. 11839-11850, 2012.

CAYLAR, P.; NOTERDAEME, O.; NAIK, K. "Digital in industry: From buzzword to value creation". **Digital McKinsey**, 2016.

CHAKRABARTI, A. A course for teaching design research methodology. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 24, n. 1, p. 317-334, 2010.

CHIARINI, A. Sustainable manufacturing-greening processes using specific Lean Production tools: an empirical observation from European motorcycle component manufacturers. **Journal of Cleaner Production**, Volume 85, Pages 226-233, 2014.

CHIERA, M.; LUPI, F.; ROSSI, A.; LANZETTA, M. Lean Maturity Assessment in ETO Scenario. **Applied Sciences** 11, 3833, 2021.

CIANO, M.P.; DALLASEGA, P.; ORZES, G.; ROSSI, T. "One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study". **International Journal of Production Research**, 2021.

COOPER, H. **Synthesizing research: A guide for literature reviews**. 3rd. ed. London: SAGE Publications, 1998.

CULOT, G; FATTORI, F.; PODRECCA, M.; SARTOR, M. "Addressing Industry 4.0 Cybersecurity Challenges". **IEEE Engineering Management Review**, vol. 47, issue 3, pp. 79-86, 2019.

DAVIES, R.; COOLE, T.; SMITH, A. "Review of Socio-technical Considerations to Ensure Successful Implementation of Industry 4.0". **Procedia Manufacturing**, Volume 11, Pages 1288-1295, 2017.

DEKHNE, A.; HASTINGS, G.; MURNANE, J.; NEUHAUS, F. "Automation in logistics: Big opportunity, bigger uncertainty". **McKinsey & Company**, 2019.

DI PIERRO, B.; SANGIORGIO, V.; FIUME, G.; FANTI, M.P. "Analysis of Industrial Changes and Enabling Technologies in Industry 4.0". **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)** Bari, Italy, 2019.

DOMBROWSKI, U.; RICHTER, T.; KRENKEL, P. "Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: A Use Cases Analysis". In: **Procedia Manufacturing** 11, p. 1061-1068, 2017.

DRESCH, A.; LACERDA, D.; ANTUNES JR, J. **Design Science Research - método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ELEFThERiADiS, R.J.; MYKLEBUST, O. A Quality Pathway to Digitalization in Manufacturing thru Zero Defect Manufacturing Practices. **6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation**, 2015.

ELHUSSEINYA, H.M.; CRISPIM, J. SMEs, Barriers and Opportunities on adopting Industry 4.0: A Review. **Procedia Computer Science** 196, pp. 864–871, 2022.

ERRO-GARCÉS, A. "Industry 4.0: defining the research agenda". **Benchmarking: An International Journal**, 2019.

FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY “**Digital Economy Monitoring Report 2018**”, 2018.

FERNANDES, A. **Inteligência Artificial**. Florianópolis: Visual Books, 2003.

FORRESTER, R. Implications of lean manufacturing for human resource strategy. **Work Study**, 44(3), 20–24, 1995.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. Industry 4.0 Market to Reach USD 337.10 Billion in 2028; Emergence of Digital Twin Technology to Propel Growth. **Fortune Business Insights™ Reports**, 2021.

FRANK, A.G.; DALENOGARE, L.S.; AYALA, N.F. “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies”. **International Journal of Production Economics** 210, pp. 15-26, 2019.

GATES, D.; BREMICKER, M. “Beyond the hype | Separating ambition from reality in i4.0”. **KPMG International**, 2017.

GATES, D.; GAMPENRIEDER, E.L.; MAYOR, T. “Global Manufacturing Out Look: Transforming for a connected future. **KPMG International**, 2018.

GEISSBAUER, R.; VEDSO, J.; SCHRAUF, S. “Industry 4.0: Building the digital enterprise”. **PWC 2016 Global Industry 4.0 Survey**, 2016.

GEISSBAUER, R.; SCHRAUF, S.; MORR, J.; WUNDERLIN, J.; KRAUSE, J.H.; ODENKIRCHEN, A. Digital Product Development 2025: Agile, Colaborative, AI Driven and Customer Centric. **PCW**, 2019.

GHADIMI, P.; DONNELLY, O.; SAR, K.; WANG, C.; AZADNIA, A.H. The successful implementation of industry 4.0 in manufacturing: An analysis and prioritization of risks in Irish industry. **Technological Forecasting & Social Change** 175, 2022.

GHOBAKHLOO, M. “The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management** Vol. 29 No. 6, pp. 910-936, 2018.

GIL, A.C. “**Como Elaborar Projeto de Pesquisa**”. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GILCHRIST, A. (2016), “Industry 4.0: The Industrial Internet of Things”, Springer, Heidelberg. He, W. and Xu, L. “A state-of-the-art survey of cloud manufacturing”, **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Vol. 28 No. 3, pp. 239-250, 2015.

GLASS, R.; SEIFERMANN, S.; METTERNICH, J. “The Spread of Lean Production in the Assembly, Process and Machining Industry”. In: **Procedia CIRP** 55, pp. 278–283, 2016.

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

GROUT J. Mistake-proofing the design of health care processes. **Agency for Health Care Research and Quality**, 2007.

HAARTMAN, R.; BENGTSSON, L.; NISS, C. "Lean practices and the adoption of digital technologies in production". **International Journal of Services and Operations Management**, 2020.

HAYKIN, S. *Neural Networks: a comprehensive foundation*. New York: **MacMillan College Publishing Company**, 1999.

HAYKIN, S. *Neural networks and learning machines*. New York: **Prentice Hall**, 2009.

HAMBACH, J.; KÜMMEL, K.; METTERNICH, J. "Development of a digital continuous improvement system for production". **Procedia CIRP**, 63, 330–335, 2017.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. "Design principles for industrie 4.0 scenarios", paper presented at the **49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)**, IEEE, Koloa, HI, New York City, NY, January, pp. 3928-3937, 2016.

HEVNER, A. A three cycle view of design science research. **Scandinavian Journal of Information Systems**, v. 19, n. 1, p. 87-92, 2007.

HEVNER, A.; MARCH, S.; PARK, J. Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

HOLMSTRÖM, J., KETOKIVI, M.; HAMERI, A. Bridging practice and theory: a design science approach, **Decision Sciences**, Vol. 40 No. 1, pp. 65-87, 2009.

HORVÁTH, D.; SZABÓ, R.Z. "Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?" **Technological Forecasting & Social Change** 146, pp. 119–132, 2019.

HOSS, M.; CATEN, C.S. (2013), "Lean schools of thought", **International Journal of Production Research**, Vol. 51 No. 11, pp. 3270-3282, 2013.

HRYCEJ, T. *Modular learning in neural networks: a modularized approach to neural network classification*. New York: **John Wiley & Sons**, 1992.

HUANG, Z.; KIM, J.; SADRI, A.; DOWEY, S.; DARGUSCH, M.S. Industry 4.0: Development of a multi-agent system for dynamic value stream mapping in SMEs. **Journal of Manufacturing Systems Volume 52**, Part A, Pages 1-12, July 2019.

IDRIS, M.R.; PRAKASH, P.S.; ABDULLAH, A. E-Kanban hybrid model for Malaysian automotive component suppliers with IoT solution. **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management** Dubai, UAE, March 10-12, 2020.

IVARI, J. A paradigmatic analysis of information systems as a design science. **Scandinavian Journal of Information Systems**, v. 19, n. 5, p. 1-23, 2007.

JACA, C.; VILES, E.; JURBURG, D.; TANCO, M. "Do Companies with Greater Deployment of Participation Systems use Visual Management More Extensively? An Exploratory Study." **International Journal of Production Research** 52 (6): 1755–1770, 2014.

JANIKOVA, D.; BEZAK, P. Prediction of production line performance using neural networks. **International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition**. Lodz: IEEE. p. 59-63, 2016.

JARRAHI, F.; MANENTI, A.; TORTORELLA, G.L.; GAIARDELLI, P. "Facing the challenges of the future through the synergetic adoption of Industry 4.0 and Lean manufacturing". **XXIV Summer School "Francesco Turco" – Industrial Systems Engineering**, 2019.

JOZANIKOHAN, G.; NOROUZI, G.H.; SAHABI, F.; MEMARIAN, H.; MOSHIRI, B. The application of multilayer perceptron neural network in volume of clay estimation: Case study of Shurijeh gas reservoir, Northeastern Iran. **Journal of Natural Gas Science and Engineering** 22, pp.119-131, 2015.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W. "**Abschotten ist keine Alternative**". In: VDI Nachrichten, Issue, 2015.

KAGERMANN, H.; ANDERL, R.; GAUSEMEIER, J.; SCHUH, G.; WAHLSTER, W. "Industrie 4.0 in a Global Context: Strategies for Cooperating with International Partners". **Acatech STUDY**, Munich: Herbert Utz Verlag, 2016.

KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜEHLKE, D. "Towards a Lean Automation Interface for Workstations." **International Journal of Production Research**, Forthcoming 55: 2845–2456, 2016.

KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. "Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies". **IFAC-PapersOnLine**, Volume 48, Issue 3, Pages 1870-1875, 2015.

KOLLA, S.; MINUFEKR, M.; PLAPPER, P. "Deriving essential components of lean and Industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs". **Procedia CIRP** 81, 753 – 758, 2019.

KOHLI, J. "RFIDs, bar codes and health care costs: A nonprofit hospital system is digitalizing its supply chain to lower cost and improve operational efficiency". Disponível online: <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/rfids-bar-codes-and-health-care-costs>, 2017.

KROLLA S.; MINUFEKR, M.; PLAPPER, P. Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. **52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems**. Procedia CIRP 81, pp. 753-758, 2019.

KUNZ, N.; WASSENHOVE, L.N. Fleet sizing for UNHCR country offices", **Journal of Operations Management**, Vol. 65 No. 3, pp. 282-307, 2019.

KÜPPER, D. "Embracing Industry 4.0 and Rediscovering Growth". Boston Consulting Group. Disponível Online: <https://www.bcg.com/en-gb/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx>, 2019.

KÜPPER, D., HEIDEMANN, A., STRÖHLE, J.; KNIZEK, C. "When lean meets Industry 4.0: the next level of operational excellence". **Boston Consulting Group**, 2017.

LAAPER, S.; KIEFER, B. "Digital Lean Manufacturing: Industry 4.0 Technologies transform Lean processes to advance the enterprise". **Deloitte Center of Integrated Research**, 2020.

LACERDA, D.; DRESCH, A.; PROENCA, A.; ANTUNES, J. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LAI, N.Y.G.; WONG, K.H.; HALIM, D.; LU, J.; KANG, H.S. Industry 4.0 Enhanced Lean Manufacturing. **8th International Conference on Industrial Technology and Management**, 2019.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H.G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. "Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, vol.6", p.239, 2014.

LEURENT, H.; BOER, E. "Fourth Industrial Revolution Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing". **World Economic Forum 91-93** route de la Capite CH-1223 Cologny/Geneva Switzerland, 2019.

LEVY, Y.; ELLIS, T. A systems approach to Conduct a Effective Literature Review in Support of Information Systems Research. **Informing Science Journal**. p. 181-212, 2006.

LEYH, C., BLEY, K., SCHAFFER, T., FORSTENHAUSLER, S. "SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0". **Proceedings of the 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS**, 7733413, pp. 1297-1302, 2016.

LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E.D.F.R.; RAMOS, L.F.P. "Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal", **International Journal of Production Research**, Vol. 55 No. 12, pp. 3609-3629, 2017.

LICHTBLAU, K.; STICH, V.; BERTENRATH, R.; BLUM, M.; BLEIDER, M.; MILLACK, A.; SCHMITT, K.; SCHMITZ, E.; SCHRÖTER, M. "IMPULS - Industrie 4.0- Readiness". **Impuls-Stiftung des VDMA**, Aachen-Köln, 2015.

LIKER, J.K.; MORGAN, J.M. The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development. **Academy of Management Perspectives**, 2006.

LIU, C.; NIU, Z.; CHANG, P.; ZHANG, B. "Assessment approach to stage of lean transformation cycle based on fuzzy nearness degree and TOPSIS". **International Journal of Production Research**, Vol. 55, No. 23, 7223–7235, 2017.

LORENZ, R.; BUSS, P.; MACUVELE, J. "Lean and Digitalization—Contradictions or Complements? **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, vol 566. Springer, 2019.

LUGERT, A.; BATZ, A.; WINKLER, H. Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries. **Journal of Manufacturing Technology Management** Vol. 29 No. 5, 2018.

LUGERT, A.; VÖLKER, K.; WINKLER, H. Dynamization of Value Stream Management by technical and managerial approach. **51st CIRP Conference on Manufacturing Systems**, pp. 701-706, 2018.

LUTHRA, S.; MANGLA, S.K. "Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chainsustainability in emerging economies". **Process Safety and Environmental Protection** 117, pp. 168–179, 2018.

MA, J.; WANG, Q.; ZHAO, Z. SLAE–CPS: Smart lean automation engine enabled by cyber-physical systems technologies. **Sensors** 17(7):1500, 2017.

MANSON, N. Is operations research really research? **Orion**, v. 22, n. 2, p. 155-180, 2006.

MARCH, S.; SMITH, G. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, v. 15, n. 1, p. 251-266, 1995.

MARINELLI, M.; DESHMUKH, A.A.; JANARDHANAN, M.; NIELSEN. Lean manufacturing and Industry 4.0 combinative application: Practices and perceived benefits. **IAFAC PapersOnLine** 54-1, pp. 288-293, 2021.

MARNEWICK, A; MARNEWICK, C. "The Ability of Project Managers to Implement Industry 4.0-related Projects". **IEEE Access**, vol. 8, pp. 314-324, 2019.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY – MIT. Lean Enterprise Self-Assessment Tool (LESAT) Version 1. **MIT**, 2001.

MATANA, G.; SIMON, A.; GODINHO, M.; HELLENO, A. Method to assess the adherence of internal logistics equipment to the concept of CPS for industry 4.0. **International Journal of Production Economics**, Volume 228, October 2020.

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, pp. 622-628, 2018.

MIDDLETON P. Lean software development: two case studies. **Software Quality Journal**, 9:241–52, 2001

MITTAL, S.; KHAN, M.A.; ROMERO, D.; WUEST, T. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. **Journal of Engineering Manufacture**, vol. 233 (5), 1342 – 1361, 2019.

MOHAMED, A.H. An Assessment Tool to Measure the Lean Construction Maturity Level. **Advances in Science, Technology and Innovation**, pp. 15 – 19, 2021.

MOHAMED, N.; AL-JAROODI, J. "Applying Blockchain in Industry 4.0 Applications". **9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)**, 2019.

MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M.K. Towards Lean Production in Industry 4.0. **7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management. Procedia Engineering** 182, pp. 466 – 473, 2017.

MÜLLER, J.M. "Assessing the barriers to Industry 4.0 implementation from a workers' perspective". **IFAC PapersOnLine** 52-13, pp. 2189–2194, 2019.

NIGHTINGALE, D. "Executive Board Roundtable: Lean Enterprise Self-Assessment Tool, **Massachusetts Institute of Technology – MIT**, 2001.

NIGHTINGALE, D.; ABDIMOMUNOVA, PERKINS, L.N.; SHIELDS, T.; SRINIVASAN, J.; VALERDI, R. LESAT Version 2.0 Facilitator's Guide, **Massachusetts Institute of Technology – MIT**, 2012.

OHNO, T. "**Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production**". Cambridge: Productivity Press, 1988.

OKULOWSKA, M. Perspectives on Investing in Industry 4.0 in Wroclaw: Before, During, and After the COVID-19 Pandemic. **ARAW Report**, 2020.

PAGLIOSA, M., TORTORELLA, G., FERREIRA, J.C.E. Industry 4.0 and Lean Manufacturing: A systematic literature review and future research directions. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2021.

PEÇAS, P.; ENCARNAÇÃO, J.; GAMBÔA, M.; SAMPAYO, M.; JORGE, D. PDCA 4.0: A New Conceptual Approach for Continuous Improvement in the Industry 4.0 Paradigm. **Applies Sciences** 11, 7671, 2021.

PERKINS, L. N.; ABDIMOMUNOVA, L.; VALERDI, R.; SHIELDS, T.; NIGHTINGALE, D. "Insights from enterprise assessment: How to analyze LESAT results for enterprise transformation". **Information Knowledge Systems Management**, 9(3/4), 153-174, 2010.

PEKARCIKOVA, M.; TREBUNA, P.; KLIMENT, M.; ROSOCHA, L. Material flow optimization through e-kanban system simulation. **International Journal of Simulation Modelling** 19(2):243-254, June 2020.

PFOHL, H.C.; YAHSI, B.; KURNAZ, T. "The impact of industry 4.0 on the supply chain". **Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics – HICL**, 2015.

PILLER, F.T.; MÖSLEIN, K. "From Economies of Scale towards Economies of Customer Interaction: Value Creation in Mass Customization Based Electronic Commerce, **15th Bled Electronic Commerce Conference eReality: Constructing the eEconomy 219**", 2002.

PLONKA FE. Developing a lean and agile work force. **Journal of Human Factors and Ergonomics in Manufacturing**, 7(1):11–27, 1997.

PRODANOV, C.; FREITAS, E. "**Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**". Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013.

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". **Conference: APMS - Production Management for Data-driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing** At: Seoul, Korea Volume I. Moon *et al.* (Eds.), IFIP, AICT 536, Part II, Springer, pp. 353-362, 2018.

POZZI, R.; ROSSI, T.; SECCHI, R. Industry 4.0 technologies: critical success factors for implementation and improvements in manufacturing companies, **Production Planning & Control**, DOI: 10.1080/09537287.2021.1891481, 2021.

PRINZ, C.; KREGGENFELD, N.; KUHLENKÖTTER, B. "Lean meets Industrie 4.0 – a practical approach to interlink the method world and cyber-physical world". **Procedia Manufacturing**, Volume 23, Pages 21-26, 2018.

PWC "The Industry 4.0 / Digital Operations Self Assessment," Disponível em: <https://i40-self-assessment.pwc.de/i40/landing/>, 2016.

PWC "Global Digital Operations Study 2018 – Digital Champions: How industry leaders build integrated operations ecosystems to deliver end-to-end customer solutions", **PWC**, 2018.

RAMADAN, M.; WANG, Z.; NOCHE, B. RFID- Enabled Dynamic Value Stream Mapping. **Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics**, 2012.

ROMERO, D.; GAIARDELLI, P.; POWELL, D.; WUEST, T.; THÜRER, M. Digital Lean Cyber-Physical Production Systems: The Emergence of Digital Lean Manufacturing and The Meaning of Digital Waste. **Conference: APMS - Production Management for Data-Driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing** At: Seoul, Korea Volume: I. Moon *et al.* (Eds.), IFIP, AICT 535, Part I, Springer, pp. 11-20, 2018.

ROMERO, D.; GAIARDELLI, P., POWELL, D., WUEST, T.; THÜRER, M. Rethinking jidoka systems under automation & learning perspectives in the digital lean manufacturing world. **Conference: 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control**, Vol. 52, Issue 13, pp. 899-903, ISSN: 2405-8963 At: Berlin, Germany, 2019.

ROMERO, D.; GAIARDELLI, P.; POWELL, D.; WUEST, T.; THÜRER, M. Total Quality Management and Quality Circles in the Digital Lean Manufacturing World. **Conference: APMS - Production Management for the Factory of the Future** At: Austin, Texas, USA Volume: F. Ameri *et al.* (Eds.), IFIP, AICT 566, Part I, Springer, pp. 3-11, 2019.

ROMERO, D.; GAIARDELLI, P.; WUEST, T.; POWELL, D.; THÜRER, M. New Forms of Gemba Walks and Their Digital Tools in the Digital Lean Manufacturing World. **Conference: APMS - Towards Smart and Digital Manufacturing** At: Novi Sad, Serbia Volume: B. Lalic *et al.* (Eds.), IFIP, AICT 592, Part II, Springer, pp. 432-440, 2020.

ROSIN, F.; FORGET, P.; LAMOURI, S.; PELLERIN, R. "Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles". **International Journal of Production Research**, Vol. 58, No. 6, 1644–1661, 2019.

ROSSINI, M.; COSTA, F.; TORTORELLA, G.L.; PORTIOLI-STAUDACHER, A. "The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers". **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 102, 3963–3976, 2019.

RUBIO, J.E.; ROMAN, R.; LOPEZ J. "Analysis of Cybersecurity Threats in Industry 4.0: The Case of Intrusion Detection". In: D'Agostino G., Scala A. (eds) **Critical Information Infrastructures Security. CRITIS 2017. Lecture Notes in Computer Science**, vol 10707. Springer, Cham, 2018.

RÜBMAN, 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". **The Boston Consulting Group**, 2015.

RÜTTIMANN, B.G.; STÖCKLI, M.T. "Lean and Industry 4.0—Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems". **Journal of Service Science and Management**, vol. 9, pp. 485-500, 2016.

SAAD, S.M.; BHOVAR, C.; BAHADORI, R.; ZHANG, H. Industry 4.0 Application in Lean Manufacturing- A Systematic Review. **Advances in Manufacturing Technology XXXIV**, 2021.

SABERI, S.; YUSUFF, R. Neural network application in predicting advanced manufacturing technology implementation performance. **Neural Computing and Applications**, v. 21, n. 6, p. 1191-1204, 2012.

SAE - Society for Automotive Engineers, SAE J4000 "Identification and measurement of best practice in implementation of lean operation". Warrendale, PA, **Society for Automotive Engineers**, 1999a.

SAE - Society for Automotive Engineers, SAE J4001 "Implementation of lean operation user manual". Warrendale, PA, **Society for Automotive Engineers**, 1999b.

SALVADORINHO; J.; TEIXEIRA, L. Stories Told by Publications about the Relationship between Industry 4.0 and Lean: Systematic Literature Review and Future Research Agenda. **Publications** 9, 29, 2021.

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** 9, pp. 811-833, 2016.

SANDERS, A.; SUBRAMANIAN, K.R.K.; REDLICH, T.; WULFSBERG, J.P. "Industry 4.0 and Lean Management – Synergy or Contradiction? A Systematic Interaction Approach to Determine the Compatibility of Industry 4.0 and Lean Management in Manufacturing Environment". **IFIP International Federation for Information Processing**, pp. 341-349, 2017.

SATOGLU S.; USTUNDAG A.; CEVIKCAN E.; DURMUSOGLU M.B. Lean Production Systems for Industry 4.0. **Industry 4.0: Managing The Digital Transformation, Springer Series in Advanced Manufacturing**, Springer International Publishing Switzerland, 2017.

SAURIN, T.A.; RIBEIRO, J.L.D.; VIDOR, G. A framework for assessing poka-yoke devices. **Journal of Manufacturing Systems**, Volume 31, Issue 3, Pages 358-366, 2012.

SAXBY, R.; CANO-KOUROUKLIS, M.; VIZA, E. An initial assessment of Lean Management methods for Industry 4.0", **The TQM Journal**, Vol. 32 No. 4, pp. 587-601, 2020.

SCHMITZ, C.; TSCHIESNER, A.; JANSEN, C.; HALLERSTEDE, S.; GARMS, F. "Industry 4.0: Capturing value at scale in discrete manufacturing". **Mckinsey & Company**, 2019.

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

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

SERVE, M.; YEN, D.C.; WANG, J.C.; LIN, B. "B2B enhanced supply chain process: toward building virtual enterprises", **Business Process Management Journal**, Vol. 8 No. 3, pp. 245-53, 2002.

SETH, D.; SETH, N.; DHARIWAL, P. Application of value stream mapping (VSM) for lean and cycle time reduction in complex production environments: a case study. **Production Planning & Control**, Vol. 28, No. 5, 398–419, 2017.

SHAH, R.; WARD, P.T. Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. **Journal of Operations Management** 21, pp. 129–149, 2003.

SHAHIN, M.; CHEN, F.F.; BOUZARY, H.; KRISHNAIYER, K. Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 107:2927–2936, 2020.

SHINGO, S. A revolution in manufacturing, the SMED system. **Productivity Press**, 1985.

SHINGO, S. Zero quality control: source inspection and the poka-yoke system. **Productivity Press**; 1988.

SIAU, K.; ZOU, C. "Industry 4.0: Challenges and Opportunities in Different Countries". **Cutter Business Technology Journal**, vol. 32, no. 6, 2019.

SIGOV, A.; RATKIN, L.; IVANOV, L., XU, L. Emerging Enabling Technologies for Industry 4.0 and Beyond. **Information Systems Frontiers**, 2022.

SIMON, H. **The Sciences of the Artificial**. Cambridge: MIT Press, 1996.

SLIM, R.; RÉMY, H.; AMADOU, C. "Convergence and Contradiction Between Lean and Industry 4.0 for Inventive Design of Smart Production Systems". **IFIP International Federation for Information Processing**, pp. 141-153, 2018.

SORDAN, J.E.; OPRIME, P.C.; PIMENTA, M.; LOMBARDI, F.; CHIABERT, P. Towards digital lean manufacturing: A Brazilian case. Conference: **4th International Conference on Quality Engineering and Management** At: Braga, Portugal (online), 2020.

STAUFEN AG. "25 Years of Lean Management: Lean Yesterday, Today and Tomorrow, **STAUFEN AG**, 2016.

TABARES, L.M.; ROBLES-CÁRDENAS, M.; ROMAINVILLE, F.P. "Evaluation and Comparison of a Lean Production System by Using SAE J4000 Standard: A Case Study on The Automotive Industry in The State of Mexico". **Brazilian Journal of Operations & Production Management** 14, pp 461-468, 2017.

TORTORELLA, G.L.; FETTERMANN, D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, Vol. 56, No. 8, 2975–2987, 2018.

TORTORELLA, G.L.; GIGLIO, R.; DUN, D.H. "Industry 4.0 adoption as a moderator of the impact of lean production practices on operational performance improvement". **International Journal of Operations & Production Management** Vol. 39 No. 6/7/8, pp. 860-886, 2019.

TORTORELLA, G.L.; PRADHAN, N.; ANDA, E.M.; MARTINEZ, S.T.; SAWHNEY, R.; KUMAR, M. Designing lean value streams in the fourth industrial revolution era: proposition of technology-integrated guidelines. **International Journal of Production Research**, 2020.

TSIGKAS, A.; FREUND, R. The Lea@n Extended Enterprise. **IFIP International Federation for Information Processing**, Volume 257, pp. 423–431, 2008.

TSOUKALAS, L.; UHRIG, R. Fuzzy and neural approaches in engineering. New York: **John Wiley & Sons**, 2007.

TYAGI, S.; CHOUDHARY, A.; CAI, X.; YANG, K. "Value Stream Mapping to Reduce the Lead-time of a Product Development Process." **International Journal of Production Economics** 160: 202–212, 2015.

VALAMEDE, L. S.; AKKARI, A. C. S. Lean Manufacturing and Industry 4.0: A Holistic Integration Perspective in the Industrial Context. **9th International Conference on Industrial Technology and Management**, Vol. 5, No. 5, 851-868, 2020.

VAN AKEN, J. Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules. **Journal of Management Studies**, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004.

VAN AKEN, J.E., CHANDRASEKARAN, A.; HALMAN, J. Conducting and publishing design science research: inaugural essay of the design science department of the Journal of Operations Management, **Journal of Operations Management**, Vols 47-48, pp. 1-8, 2016.

VDI/VDE-GMA. "Statusreport Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0", **VDI/VDE-GMA**, 2015.

VENABLE, J. The role of theory and theorising in design science research. **DESRIST**, v. 24/25, n. 1, p. 1-18, 2006.

WAGNER, T.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. "Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems," **Procedia CIRP**, vol. 63, pp. 125–131, 2017.

WANG, B.; ZHAO, J.; WAN, Z.; MA, J. Lean Intelligent Production System and Value Stream Practice. **3rd International Conference on Economics and Management (ICEM 2016)**, 2016.

WARD, P.; ZHOU, H. "Impact of Information Technology Integration and Lean/Just-In-Time Practices on Lead-Time Performance". **Decision Sciences** Volume 37 Number 2, 2006.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. **MIS Quarterly**, 26 (2), pp.13-23, 2002.

WILLIS, M.; DIMASSIMO, C.; MONTAGUE, G.; THAN, M.; MORRIS, A. Artificial neural networks in process engineering. **IEEE Proceedings-D**, v. 138, n. 3, p. 256-266, 1991.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. "Lean thinking—banish waste and create wealth in your corporation", **Journal of the Operational Research Society**, vol. 48, no. 11, p. 1148, 1997.

WONG, B.K., SELVI, Y. Neural network applications in finance: a review and analysis of literature (1990–1996). **Inform Management** 34 (3):129–139, 1998.

ZANGIACOMI, A.; PESSOT, E.; FORNASIERO, R.; BERTETTI, M.; SACCO, M. Moving towards digitalization: a multiple case study in manufacturing, **Production Planning & Control**, 31:2-3, 143-157, 2020.

ZHOU, H.; BENTON, W.C. "Supply chain practice and information sharing", **Journal of Operations Management**, Vol. 25 No. 6, pp. 1348-65, 2007.

APÊNDICE

Apêndice A – Carta de apresentação para a aplicação do método nas empresas selecionadas

CARTA DE APRESENTAÇÃO DO PROJETO DE PESQUISA (TESE)

IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA PRIORIZAÇÃO CONSIDERANDO O GRAU DE MATURIDADE *LEAN*

Apresentação

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP) desenvolve estudos nas áreas de Gestão e Estratégias e Engenharia do Produto e do Processo. Essa pesquisa, em especial, enquadra-se na área de "Gestão e Estratégias" na linha de pesquisa "Gestão Estratégica de Operações".

Trata-se de um projeto de Doutorado em Engenharia de Produção que objetiva propor um método que permita definir uma ordem de prioridade para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 considerando o grau de maturidade das práticas *Lean*. Por meio da aplicação do método, pretende-se buscar sugestões e observações dos profissionais da área da indústria sobre o processo de aplicação do método e sobre os resultados encontrados.

A total transparência nas respostas é de fundamental importância para se alcançar o objetivo proposto. O processo de aplicação do método seguirá as seguintes etapas: 1. Envio e revisão de uma tabela com as definições das 24 tecnologias da Indústria 4.0, identificadas no projeto de pesquisa; 2. Apresentação das relações e os benefícios entre determinadas práticas *Lean* e determinadas tecnologias da Indústria 4.0; 3. Aplicação do método de avaliação de maturidade do *Lean*; 4. Apresentação dos resultados, com relação a maturidade das práticas *Lean* e as ordens de prioridade das tecnologias da Indústria 4.0. Reunião de fechamento e *feedback* com o(s) entrevistado(s) para análise dos resultados, observações e sugestões.

Os dados serão utilizados apenas no âmbito acadêmico, sendo garantido o SIGILO ABSOLUTO do nome da empresa e de seu respondente.

Agradecemos desde já a atenção e contamos com sua valorosa colaboração.

Atenciosamente,

Diógenes Coriquazi
Doutorando em Engenharia de Produção
dio_marcelo@yahoo.com.br

Prof. Dr. Alexandre T. Simon
Orientador
alexandre.simon@unimep.br