



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

SERGIO TENORIO DOS SANTOS NETO

Drives para implantação e gestão do Lean Six Sigma integrado à Indústria 4.0

Guaratinguetá

2024

Sergio Tenorio Dos Santos Neto

Drives para implantação e gestão do Lean Six Sigma integrado à Indústria 4.0

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, *Campus* Guaratinguetá, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Otávio José de Oliveira

Guaratinguetá

2024

S237d Santos Neto, Sergio Tenorio dos
Drives para implantação e gestão do Lean Six Sigma
integrado à indústria 4.0 / Sergio Tenorio dos Santos Neto
- Guaratinguetá, 2023.
152 f : il.
Bibliografia: f. 132-144

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Otávio José de Oliveira

1. Seis sigma (Padrão de controle de qualidade). 2. Gestão
da qualidade total. 3. Inovações tecnológicas. I. Título.
CDU 658.56(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8/3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este trabalho oferece soluções para melhorar a competitividade da indústria, contribuindo com a otimização de processos, redução de desperdícios e melhoria da qualidade. Ele vai de encontro a ODS 9 (Indústria e Inovação), pois contribui com a industrialização sustentável, e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), pois contribui com a gestão eficiente de recursos em ambientes empresariais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This work offers solutions to improve industrial competitiveness, contributing to the optimization of processes, reducing waste, and improving quality. The work meets ODS 9 (Industry and Innovation), as it contributes to sustainable industrialization, and ODS 12 (Responsible Consumption and Production), as it contributes to the efficient management of resources in business environments.



SERGIO TENORIO DOS SANTOS NETO

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Documento assinado digitalmente
 **MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES**
Data: 16/02/2024 09:07:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **OTAVIO JOSE DE OLIVEIRA**
Data: 25/01/2024 12:04:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. OTÁVIO JOSÉ DE OLIVEIRA
Orientador – UNESP

Documento assinado digitalmente
 **MESSIAS BORGES SILVA**
Data: 24/01/2024 17:15:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO CELSO DE CAMPOS**
Data: 24/01/2024 18:31:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FERNANDO CELSO DE CAMPOS
UNIMEP

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO CARDOSO MACHADO**
Data: 24/01/2024 22:45:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MÁRCIO CARDOSO MACHADO
UNIP

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO JULIANI**
Data: 24/01/2024 17:31:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FERNANDO JULIANI
USP

DADOS CURRICULARES

SERGIO TENORIO DOS SANTOS NETO

NASCIMENTO	06.02.1972 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Milton Tenorio dos Santos Neto Maria Aparecida Tenorio dos Santos
1990/1993	Curso de Graduação Bacharel em Análise e Desenvolvimento de Sistemas
2004/2006	Especialização em Automação e Controle Industrial
2005/2006	Especialização em MBA Executivo em Gerenciamento de Projetos
2015/2017	Mestrado profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas forças renovadas a cada dia. Agradeço em especial minha família, minha esposa e meus amigos;

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Otávio José de Oliveira* pela orientação e incentivo. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado não seria concluído;

A CAPES pelo fomento científico que subsidiou o desenvolvimento desta pesquisa;

Aos meus colegas estudantes da pós-graduação pelo companheirismo, momentos de estudo e compartilhamento de experiências;

Aos meus pais Milton Tenorio dos Santos e Maria Aparecida Tenorio dos Santos, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram e me orientaram sobre os melhores caminhos;

A minha esposa Milena e minhas filhas Samara, Sarah e Valentina pelo carinho, apoio e paciência diante de minha ausência nos momentos de dedicação a este trabalho;

e aos funcionários da UNESP do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e comprometimento no atendimento.

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

“Bendito o DEUS e Pai de nosso Senhor Jesus Cristo, que nos abençoou
com todas as bênçãos espirituais nas regiões celestiais em Cristo.”

Efésios 1:3

RESUMO

Com o cenário econômico global de acirrada competitividade as grandes empresas industriais precisam definir estratégias para superar os concorrentes e conquistar novos mercados. O *Lean Six Sigma* (LSS) e a Indústria 4.0 (I4) podem fazer parte dessas estratégias. O LSS é uma estratégia que ajuda as empresas na melhoria de seus resultados operacionais e financeiros por meio da redução de desperdícios e eliminação da variabilidade dos processos. A I4 é a melhoria da produtividade das empresas por meio da utilização de tecnologias que conectam os ambientes físicos e digitais, virtualizam processos e tornam os ambientes produtivos mais otimizados. Segundo a literatura científica, o LSS e a I4 têm propósitos complementares que viabilizam sua integração. Nesse sentido, o objetivo desta tese é propor um conjunto de *drives* que potencializem a integração do LSS à I4 e ajudem as grandes empresas do setor industrial a melhorarem sua competitividade. A consecução deste objetivo se deu por meio de um método múltiplo composto por Revisão da Literatura científica, Análise de Conteúdo e execução de quatro Estudos de Caso em grandes empresas do setor industrial que estão integrando o LSS à I4. A Revisão da Literatura contribuiu com a composição do arcabouço teórico. A Análise de conteúdo forneceu elementos para a sistematização dos princípios do LSS e da I4, o que viabilizou o cruzamento destes princípios e permitiu a sistematização das sinergias e dissonâncias entre os temas. Já a execução dos Estudos de Caso permitiu ao pesquisador conhecer a realidade das empresas estudadas. A sistematização das sinergias e dissonância, somado as informações obtidas nos estudos de caso, a experiência do autor deste trabalho, e as contribuições de um grupo de especialistas, viabilizaram a proposição de *drives* contendo recomendações para a integração do LSS à I4. A principal contribuição científica deste trabalho é a sistematização de um conjunto de aspectos sinérgicos e dissonantes entre o LSS e a I4, a comprovação desses aspectos em quatro grandes empresas industriais, a comprovação em campo da relevância da integração entre o LSS e a I4 para essas empresas e, por fim, a proposição de *drives* inéditos que colaboram com essa integração, o que abre espaço para novas pesquisas científicas explorarem e contribuírem com o desenvolvimento do tema. Como contribuição aplicada este trabalho disponibiliza um conjunto de informações relevantes que auxiliam os gestores na integração do LSS à I4, o que gera importante vantagem competitiva em relação à concorrência, e contribuiu para o preenchimento de lacunas científicas relacionadas a essa integração, expandindo as fronteiras do conhecimento sob o tema.

PALAVRAS -CHAVE: lean six sigma; indústria 4.0; integração; tecnologias digitais.

ABSTRACT

The fiercely competitive global economic scenario requires large companies to define strategies to overcome competitors and conquer new markets. Lean Six Sigma (LSS) and Industry 4.0 (I4) can be part of these strategies. LSS is a strategy that helps companies improve their operational and financial results by reducing waste and eliminating process variability. I4 is the improvement of companies' productivity using technologies that connect physical and digital environments, virtualize processes, and make production more optimized. According to scientific literature, LSS and I4 have complementary purposes that make their integration viable. This thesis has the objective of a set of drives that enhance the integration of LSS into I4 and help large companies in the industrial sector improve their competitiveness. This thesis used multiple methods that use Scientific Literature Review, Content Analysis, and execution of four Case Studies in industrial companies that integrate LSS into I4. The Literature Review contributed to the composition of the theoretical framework. Content Analysis provided elements for the systematization of the LSS and I4 principles, which made it possible to cross-reference these principles and allowed the systematization of synergies and dissonances between the themes. The execution of the Case Studies allowed the researcher to understand the reality of the companies studied. The systematization of synergies and dissonance, combined with the information obtained in the case studies, the experience of the author of this work, and the contributions of a group of experts, made it possible to propose drives containing recommendations for the integration of LSS into I4. The main scientific contribution of this work is the systematization of a set of synergistic and dissonant aspects between the LSS and the I4, the verification of these aspects in four large industrial companies, and, finally, the field proof of the relevance of the integration between the LSS and the I4 for these companies, which opens space for new scientific research to explore and contribute to the development of the theme. As an applied contribution, this work provides relevant information that assists managers in the LSS and I4 integration, which generates a relevant competitive advantage concerning the competition and contributes to attending scientific gaps related to this integration, expanding the frontiers of knowledge on the subject.

KEYWORDS: lean six sigma; industry 4.0; integration; digital technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Publicações sobre Lean ou LSS com I4 no período de 2011-2023 na Scopus	20
Figura 2 – Nível de Perfeição Six Sigma	25
Figura 3 – Produção científica sobre LSS no período de 2011 a 2023 na base Scopus	28
Figura 4 - Integração das estratégias	29
Figura 5 – Produção científica sobre I4 no período de 2011 a 2023 na base Scopus	36
Figura 6 - Classificação da pesquisa com destaque para os itens aplicados ao estudo	47
Figura 7 – Fluxo metodológico da pesquisa	49
Figura 8 - Princípio da I4 propostos por Shafiq <i>et al.</i> , 2015	63
Figura 9 - Princípio da I4 propostos por Vogel-Heuser and Hess (2016)	63
Figura 10 – Termos potenciais para compor os princípios da I4	64
Figura 11 - Nível de maturidade da I4	64
Figura 12 - Categorias influenciadas pelo LSS e I4	69
Figura 13 - Drives para integração do LSS à I4	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Temas abordados nos 30 artigos mais citados sobre LSS (2011 a 2020)	29
Quadro 2 – DMAIC	31
Quadro 3 – Características do LSS	32
Quadro 4 – Atribuições dos Belts	33
Quadro 5 – Organizações certificadoras	33
Quadro 6 - Características da Indústria 4.0	37
Quadro 7 – Testes do projeto dos estudos de caso	52
Quadro 8 – Caracterização das organizações pesquisadas	53
Quadro 9 – Princípios LSS	56
Quadro 10 – Sistematização dos Princípios da I4	65
Quadro 11 – Agrupamento das contribuições dos trabalhos sobre LSS e I4	70
Quadro 12 – Sinergias entre o LSS e a I4	73
Quadro 13 – Dissonâncias entre o LSS e a I4	74
Quadro 14 – Caracterização das empresas estudadas	75
Quadro 15 – Sinergias entre o LSS e a I4 nos estudos de caso	115
Quadro 16 – Dissonâncias entre o LSS e a I4 nos estudos de caso	119
Quadro 17 – Boas práticas e dificuldades na integração do LSS à I4	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nível de Conformidade LSS com shift de 1,5 desvios-padrão	26
Tabela 2 – Nível de Conformidade LSS sem shift de 1,5 desvios-padrão	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASQ	<i>American Society for Quality</i>
ATMAE	<i>Association of Technology, Management, and Applied Engineering</i>
BPM	<i>Business Process Management</i>
CPS	<i>Cyber Physical Systems</i>
I4	Indústria 4.0
IcT	<i>Information and communications technology</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IT	<i>Information Technology</i>
IASSC	<i>International Association for Six Sigma Certification</i>
LSS	<i>Lean Six Sigma</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
TICs	Tecnologias da Informação e Comunicação
TPS	<i>Toyota Production System</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	18
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	18
1.3	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	19
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1	LEAN SIX SIGMA.....	23
2.2	INDÚSTRIA 4.0.....	35
2.3	LEAN SIX SIGMA INTEGRADO À INDÚSTRIA 4.0.....	43
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	47
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	47
3.2	FLUXO METODOLÓGICO.....	48
4	SISTEMATIZAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DO LSS E DA I4.....	55
4.1	SISTEMATIZAÇÃO DOS PRINCÍPIOS LSS.....	55
4.1.1	Foco no cliente.....	57
4.1.2	Desenvolver a liderança.....	58
4.1.3	Desenvolver a força de trabalho.....	58
4.1.4	Gerenciar projetos.....	59
4.1.5	Melhorar continuamente os processos.....	60
4.1.6	Utilizar ferramentas melhoria.....	61
4.1.7	Implementação de controles.....	61
4.2	SISTEMATIZAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DA I4.....	62
4.2.1	Digitalização.....	66
4.2.2	Conectividade.....	66
4.2.3	Dados compartilhados.....	67
4.2.4	Aprendizado.....	67
4.2.5	Capacidade de predição.....	68
4.2.6	Capacidade de autoajuste.....	68
4.3	RELAÇÃO TEÓRICA ENTRE LSS E I4.....	68
5	SISTEMATIZAÇÃO DAS SINERGIAS E DISSONÂNCIAS.....	73

6	ESTUDOS DE CASO	75
6.1	APRESENTAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO.....	75
6.1.1	Empresa A.....	75
6.1.2	Empresa B.....	88
6.1.3	Empresa C.....	97
6.1.4	Empresa D.....	108
6.2	ANÁLISE CRUZADA DOS CASOS.....	115
6.2.1	Sinergias e dissonâncias nos estudos de caso.....	115
6.2.2	Boas práticas e dificuldades encontras nos estudos de caso.....	120
7	DRIVES PARA INTEGRAÇÃO DO LEAN SIX SIGMA À I4.....	125
8	CONCLUSÃO.....	132
	REFERÊNCIAS.....	138
	APÊNDICES.....	151

1 INTRODUÇÃO

O cenário econômico global cada vez mais digitalmente conectado exige que as grandes empresas industriais procurem desenvolver estratégias para superar desafios e vencer a concorrência. As grandes empresas industriais são organizações relevantes no cenário mundial, pois contribuem com o crescimento econômico, investem em inovação tecnológica, cooperam com a sustentabilidade ambiental e contribuem com o desenvolvimento da sociedade. Elas desempenham um papel fundamental e crucial na economia global investindo em recursos humanos, melhoria de processos, aumento da produtividade e desenvolvimento tecnológico (KUMAR; SINGH, 2021). Melhorar a qualidade de seus produtos e serviços, reduzir o retrabalho, diminuir os prazos de entrega e reduzir os custos são desafios que as grandes empresas industriais precisam superar para serem mais competitivas (DOMBROWSKI, *et al.*, 2017; VARELA *et al.*, 2019).

Nesse sentido, o *Lean Six Sigma* (LSS) e a Indústria 4.0 (I4) podem ajudar os gestores das grandes empresas industriais na transposição destes desafios (VARELA *et al.*, 2019; VILLALBA-DIEZ *et al.*, 2019). O primeiro é uma estratégia para eliminação de desperdícios e redução de variabilidade (JAYARAM, 2016; PRAHARSI *et al.*, 2021) e a segunda uma combinação de tecnologias com elevado nível de integração computacional que pode auxiliar as grandes empresas no aumento da produtividade, e consequentemente, na melhoria de sua competitividade perante o mercado global (BUSCHER; BORGER, 2017; TORTORELLA; FETTERMAN, 2018; ROSSINI *et al.*, 2019).

A utilização do LSS pode melhorar os resultados financeiros das empresas, tornar essas organizações mais rentáveis e maximizar os ganhos dos acionistas, entre outros benefícios. Essa estratégia utiliza uma abordagem estruturada que auxilia os gestores na identificação das fontes de desperdício e no mapeamento das variações de processo, o que impacta positivamente no ambiente organizacional, na motivação da força de trabalho, nos resultados operacionais e nos resultados financeiros (LAUREANI; ANTONY, 2012; ALHURAISH *et al.*, 2017).

Na utilização do LSS as empresas têm a sua disposição um conjunto de ferramentas que ajuda a força de trabalho no planejamento, no levantamento de informações, na análise, na identificação de problemas e na definição e priorização de ações de melhoria (PATYAL; MADDULETY, 2015; CHIARINI; KUMAR, 2021). Nesse contexto, destaca-se a importância estratégica do LSS para o incremento da competitividade das empresas e a relevância de estudos voltados para sua aplicação.

Já na I4, diversas tecnologias são integradas com o objetivo de digitalizar processos, minimizar falhas operacionais, aumentar o nível de customização dos produtos e aumentar a flexibilidade das empresas, entre outras possibilidades (SANDERS *et al.*, 2016; BUER *et al.*, 2018; GHOBAKHLOO; FATHI, 2020).

Essas tecnologias têm potencial para conectar máquinas e processos independente de sua localização física, viabilizando a troca de informações em toda a cadeia produtiva, o que municia a força de trabalho com informações precisas e confiáveis sobre os processos, melhora os processos decisórios e aumenta a assertividade da liderança (LEE *et al.*, 2015; LU, 2017).

No ambiente da I4, máquinas são automatizadas com o objetivo de propor as parametrizações mais adequadas para a produção de cada produto, o momento ideal para realizar as manutenções preditivas, as melhores sequências de produção em função da demanda e da disponibilidade de matérias-primas, entre outras aplicações (LASI *et al.*, 2014; DRATH e HORCH, 2014; LEE *et al.*, 2015). Nesse contexto, os ambientes industriais tornam-se descentralizados, flexíveis e cada vez mais colaborativos, o que impacta de forma direta em questões como a qualificação da mão de obra, disponibilização e otimização de recursos, customização de produtos, eficiência energética e sustentabilidade (LEE *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016; WOLLSCHLAEGGER *et al.*, 2017).

A I4 é importante para o setor industrial e extremamente relevante no contexto socioeconômico mundial, sendo pertinentes os estudos científicos que contribuam com a ampliação do conhecimento sobre esse tema, com o direcionamento de novas pesquisas científicas que abordem a melhoria da competitividade das empresas e com a compreensão dos impactos sociais e econômicos decorrentes do uso das tecnologias digitais na sociedade (BUSCHER; BORGER, 2017). A I4 pode impactar em maior ou menor escala nos ambientes produtivos em aspectos como produtividade, customização em massa, mão de obra e exigências no nível de segurança dos dados, a depender da complexidade das tecnologias utilizadas, do grau de automação dos processos, do nível de competência das equipes envolvidas, e principalmente, do envolvimento e apoio da alta direção (WANG *et al.*, WOLLSCHLAEGGER *et al.*, 2017).

Por todo exposto, o LSS e a I4 podem ser definidos como estratégias para melhoria da competitividade das empresas, com sinergias e propósitos complementares, mas também com aspectos divergentes e antagônicos. Nesse sentido, a implantação e a gestão do LSS integrado à I4, se realizada de forma planejada e estruturada, pode beneficiar as empresas criando ambientes enxutos e, ao mesmo tempo, tecnológicos e inteligentes. Dentre os benefícios gerados por essa integração destacam-se:

- A utilização do LSS contribui com a eliminação de desperdícios e cria ambientes produtivos mais enxutos antes da implementação da I4, o que permite maximizar o retorno sobre os investimentos em tecnologias digitais (KASPAR; SCHNEIDER, 2015; SANDERS 2016; VARELA *et al.*, 2019);
- A utilização da I4 contribui com a coleta, armazenamento e compartilhamento de dados em tempo real, com a implantação de controles automatizados e a criação de sistemas de simulação e predição, o que favorece, agiliza e empodera os projetos de melhoria LSS (BUSCHER; BORGER, 2017; DOMBROWSKI *et al.*, 2017; TORTORELLA; FETTERMANN, 2018).

Nesse contexto, destaca-se a importância da realização de pesquisas científicas que explorem a integração do LSS à I4 com o objetivo de melhorar a competitividade e os resultados financeiros das grandes empresas industriais. Sendo assim, a questão de pesquisa que norteou o desenvolvimento deste trabalho foi: de que forma é possível potencializar a integração do LSS à I4 considerando os aspectos sinérgicos e dissonantes entre os temas, a fim de gerar vantagem competitiva para as grandes empresas industriais ?

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O principal objetivo desta tese é propor um conjunto de *drives* para a integração do LSS à I4 com o intuito de aumentar a competitividade das grandes empresas do setor industrial. Para a consecução desse objetivo são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Sistematizar os princípios do LSS e da I4 e apresentar a relação teórica entre eles a partir de revisão sistemática da literatura;
- Sistematizar as sinergias e as dissonâncias entre o LSS e a I4, e considerá-las como elementos chave na proposição dos *drives*;
- Identificar em campo a relação entre o LSS e a I4 a partir de quatro estudos de casos realizados em grandes empresas do setor industrial brasileiro;

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa foi restrita (condições de contorno) a grandes empresas do setor industrial que atuam no Brasil, e estão integrando o LSS à I4. Dessa forma procurou-se restringir o escopo de análise em relação ao objeto de estudo (integração do LSS à I4), de forma a garantir a exequibilidade da pesquisa.

1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Com o objetivo de melhorar a competitividade de sua indústria, o governo alemão criou em 2011 uma estratégia denominada Indústria 4.0. Esta iniciativa foi um esforço conjunto entre governo, universidades e indústrias alemãs, envolvendo investimentos e colaboração em pesquisa e desenvolvimento, além de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento tecnológico. Posteriormente, o tema ganhou o interesse da academia e passou a ser estudado por pesquisadores de vários países, sendo referenciado como a 4ª Revolução Industrial (MRUGALSKA *et al.*, 2017; SANDERS *et al.*, 2016). O LSS é a combinação das estratégias *Lean* e *Six Sigma* e ganhou força no final da década de 1990 com a publicação de trabalhos científicos explorando a sua importância como uma estratégia para a melhoria contínua dos processos, dos produtos e dos serviços (ANTONY, 2011; DROHOMERETSKI *et al.*, 2014).

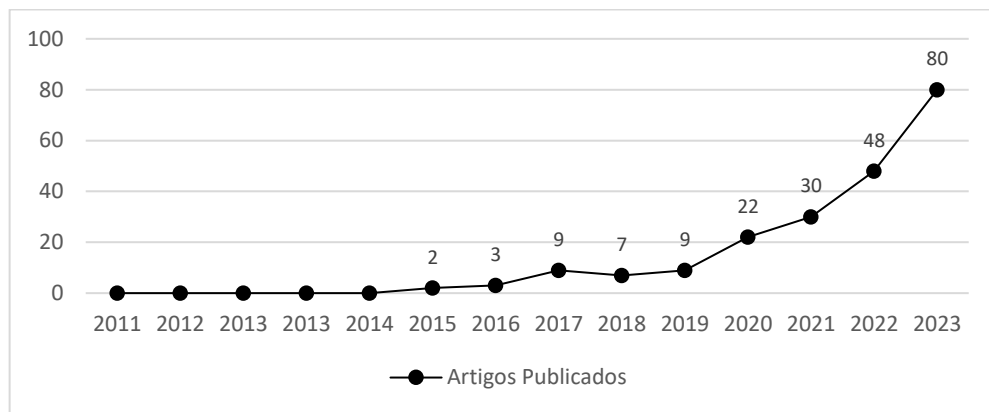
Nesse sentido, o LSS integrado à I4 pode ajudar as empresas a acelerar e dar maior robustez aos processos de melhoria contínua por meio da utilização das tecnologias digitais empregadas na I4, e por outro lado, reduzir o *break-even point* (BEP) e aumentar o retorno sobre os investimentos (ROI) em tecnologias digitais por meio da utilização do LSS como estratégia para eliminação de desperdícios antes da digitalização dos processos, o que deve tornar mais assertiva a implantação da I4 nos ambientes industriais (BUSCHER; BORGER, 2017). Este trabalho contribui com a comprovação desse cenário em quatro grandes empresas industriais e, por fim, comprova em campo a relevância da integração entre o LSS e a I4 para essas empresas.

O setor industrial brasileiro pode ser muito beneficiado pela utilização do LSS integrado à I4. Ele é um importante setor da economia empregando 9,7 milhões de trabalhadores, o que representa 20% dos empregos formais do país, e 20,4% do Produto Interno Bruto. O setor responde por 69,2% das exportações e 69% dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, e por 33% dos tributos pagos ao governo federal (CNI, 2020). Por essa razão, ao apresentar *drives* para a implantação e gestão do LSS integrado à I4 em grandes empresas do setor industrial com atividade no país, espera-se que este trabalho possa contribuir significativamente com o desenvolvimento da indústria brasileira.

Na literatura científica observam-se artigos explorando a implantação e a utilização do *Lean Manufacturing* combinado com a I4 a partir de 2015, e artigos abordando o uso combinado do LSS com a I4 dois anos depois, a partir de 2018 (ARCIDIACONO; PIERONI, 2018). A integração do LSS à I4 é um caminho para maximizar os resultados das grandes empresas por meio da criação de processos enxutos e ao mesmo tempo digitalizado, o que tem despertado

cada vez mais o interesse da comunidade científica e das empresas ao redor do mundo. Nesse sentido observa-se uma evolução no número de publicações sobre o tema nos últimos anos. Na Figura 1 apresenta-se a evolução no período de Jan/2011 a Ago/2023, sendo identificados 210 artigos abordando os temas *Lean Manufacturing* ou LSS combinados com a I4. No Apêndice B são apresentados os trinta artigos mais citados sobre o tema no período de Jan/2011 a Ago/2023 na base de dados Scopus.

Figura 1 – Publicações Lean ou LSS com I4 de Jan/2011 a Ago/2023 na base Scopus



Fonte: Produção do próprio autor.

Nesses artigos foram identificadas várias lacunas da pesquisa que podem nortear os pesquisadores no desenvolvimento de futuros trabalhos. Essas lacunas reforçam a necessidade do desenvolvimento de novas pesquisas para a ampliação das bases de conhecimento existentes. O atendimento dessas lacunas pode ajudar as empresas na missão de capturar todos os benefícios decorrentes da utilização do LSS integrado à I4, maximizando os resultados obtidos a partir dos projetos de melhoria.

Entre as importantes lacunas de pesquisas identificadas na literatura científica estão o desenvolvimento de trabalhos que apresentem métodos para a integração do LSS à I4 (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; DOMBROWSKI *et al.*, 2018), trabalhos que identifiquem os requisitos técnicos para a integração do LSS à I4, a identificação dos benefícios e das dificuldades encontradas durante a integração do LSS à I4 (SANDERS *et al.*, 2016, MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017), a apresentação de recomendações para a integração na perspectiva de princípios da I4 (CHIARINI; KUMAR, 2021), trabalhos que aprofundem o estudo sobre a integração do LSS à I4 a partir de pesquisas empíricas que considerem os aspectos sinérgicos entre os dois temas (CIANO *et al.*, 2021), a identificação dos efeitos da implementação do *Lean* no ambiente da I4 (TORTORELLA; FETTERMANN, 2017), a proposição de padrões para a integração do LSS à I4 (LEYH *et al.*, 2017; BUER *et al.*, 2018),

a influência das tecnologias da I4 nos sistemas de produção enxuta (METTERNICH *et al.*, 2017), a identificação dos aspectos sinérgicos da I4 em relação as ferramentas utilizadas no *Lean* (LEYH *et al.*, 2017), e a apresentação de estudos de caso que explorem de relação prática dos princípios *Lean* com as tecnologias da I4 (JAYARAM, 2016).

Tortorella e Fettermann (2017) sugerem ainda, que futuros trabalhos identifiquem as barreiras para a utilização do *Lean* integrado à I4 e apresentem soluções para mitigar os efeitos e os conflitos gerados a partir dessa integração, o que pode ajudar os gestores empresariais a potencializar os benefícios da integração.

A realização do presente trabalho permitiu o preenchimento da lacuna de pesquisa identificada no trabalho de Chiarini e Kumar (2021) quanto a proposição de recomendações para integração do LSS à I4 a partir dos princípios da I4. Todavia, o presente trabalho foi além, considerando também os princípios do LSS e sua interação com os princípios da I4. Este trabalho também preenche a lacuna de pesquisa identificada no trabalho de Ciano *et al.* (2021) em relação ao mapeamento dos aspectos sinérgicos entre LSS e a I4, porém, de forma mais abrangente, também identifica os aspectos dissonantes entre eles, analisando de forma prática esses aspectos em quatro estudos de caso, o que também contribui com o preenchimento da lacuna de pesquisa identificada no trabalho de Jayaram (2016), quanto a necessidade de estudos de caso que explorem de forma relação aspectos da integração do LSS à I4.

A utilização combinada do LSS à I4 permite que as grandes empresas industriais potencializem o melhor dessas duas estratégias, ajudando-as na melhoria de seus resultados financeiros e na melhoria de sua competitividade. Portanto, a justificativa deste trabalho de pesquisa de doutorado reside no preenchimento das lacunas de pesquisa identificadas nos trabalhos de Jayaram (2016), Chiarini e Kumar (2021), e Ciano *et al.* (2021), e na inexistência de diretrizes claras que auxiliem as grandes empresas industriais na integração do LSS à I4 com vistas a aumentar a sua competitividade. Nesse aspecto, registra-se o ineditismo do trabalho e sua relevância para a indústria e para a academia.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho está estruturado em sete seções. Esta primeira seção denominada “Introdução”, na qual são apresentados os objetivos, delimitação, justificativa e estrutura da pesquisa, além das seções, “Referencial teórico”, “Método de pesquisa”, “Sistematização dos princípios do LSS e da I4”, “Sistematização das sinergias e dissonâncias entre o LSS e a I4”,

“Estudos de caso”, “*Drives* para integração do LSS à I4” e “Conclusão”. O trabalho apresenta ainda as seções “Referências bibliográficas” e “Apêndices”.

Na Seção 2, denominada “Referencial teórico”, estão presentes os tópicos “LSS”, “I4” e por fim, “LSS combinado com a I4”. O primeiro apresenta conceitos e fundamentos do LSS, o segundo conceitos e fundamentos da I4, e o terceiro discorre sobre o uso do LSS combinado com a I4. Esses tópicos compõem o referencial teórico e embasam a presente pesquisa, subsidiando a realização dos estudos de caso e a proposição dos *drives* para a integração do LSS à I4. Para a composição do referencial teórico, procurou-se priorizar as obras de pesquisadores especialistas e trabalhos científicos recentes provenientes de artigos indexados em periódicos internacionais.

Na Seção 3, “Método de pesquisa”, apresenta-se a sequência metodológica utilizada para a consecução deste trabalho, bem como os detalhes de seu planejamento, execução e procedimentos técnicos. Na Seção 4, “Sistematização dos princípios do LSS e da I4”, apresenta-se a sistematização dos princípios do LSS e da I4 e a relação teórica entre eles. Na Seção 5, “Sistematização das sinergias e dissonâncias entre o LSS e a I4” são sistematizadas as sinergias e dissonâncias existentes entre os temas.

Na Seção 6, “Estudos de caso”, apresentam-se as características das empresas estudadas, as estratégias utilizadas por estas empresas no processo de integração do LSS à I4, as boas práticas e as dificuldades identificadas durante o processo de integração.

Na Seção 7 são apresentados os *drives* para integração do LSS à I4, sendo esses *drives* propostos a partir da teoria científica, das informações obtidas nos quatro estudos de caso, da experiência do autor deste trabalho, e por fim, da contribuição de um grupo de especialistas formado por um consultor LSS, um especialista em I4 e um pesquisador no campo da integração do LSS à I4.

Na sequência, na Seção 8, apresenta-se a conclusão do trabalho, na qual se evidencia o atingimento dos objetivos propostos, as suas contribuições e uma síntese dos resultados da pesquisa. Por fim, são apresentados as referências bibliográficas e os apêndices.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentada a revisão teórica sobre os temas LSS, I4 e “LSS combinado com a I4”. Para o primeiro tema são apresentadas as definições, as características, as ferramentas utilizadas e os principais fatores críticos de sucesso para sua implementação. Já no segundo tema apresentam-se conceitos, tecnologias e fatores críticos de sucesso para sua implementação. Por fim, no terceiro tema, são apresentados aspectos quanto ao uso combinado do LSS com a I4, características e fatores críticos de sucesso para sua integração.

2.1 LEAN SIX SIGMA

A abertura dos mercados globais cada vez mais conectados digitalmente, e o aumento do nível de exigência dos consumidores, requerem que as grandes empresas industriais desenvolvam estratégias cada vez mais inovadoras para superar desafios e melhorar a competitividade de suas operações. A melhoria da qualidade de seus produtos e serviços, a flexibilização de suas linhas de produção, a redução dos prazos de entrega e a redução dos custos de produção são alguns desses desafios (DOMBROWSKI *et al.*, 2017; JULIANI; OLIVEIRA, 2020). A utilização do LSS pode ser uma estratégia adequada para que as empresas superem estes desafios e melhorem seu posicionamento no mercado. O LSS é definido como uma estratégia que auxilia as organizações na eliminação de desperdícios, o que pode conduzir as empresas no caminho da redução consistente da variabilidade em seus processos (LAUREANI; ANTONY, 2012; JAYARAM, 2016).

O LSS é uma estratégia que objetiva potencializar os resultados das empresas a partir de projetos de melhoria (LANDE *et al.*, 2016; THOMAS *et al.*, 2016; ALI *et al.*, 2020). Ela ajuda as empresas na identificação de problemas e oportunidades, coleta de dados, identificação das causas dos problemas, gestão de planos de ação e implantação de controles para manter a estabilidade dos processos (CORBETT, 2011; DROHOMERETSKI *et al.*, 2014; CHERRAFI *et al.*, 2016; SKALLI *et al.*, 2020).

O LSS é a combinação das estratégias Lean e Six Sigma e seu surgimento pode ser dividido em dois momentos históricos. Primeiro momento com o surgimento do *Lean Manufacturing*, e segundo momento com o surgimento do *Six Sigma*. O *Lean Manufacturing* também conhecido no mercado e na academia como *Lean Production*, é considerado uma estratégia que concentra esforços para eliminação de desperdícios e maximização da produtividade dos processos de fabricação. Essa estratégia foi desenvolvida originalmente pela

Toyota na década de 1950 e, desde então, tem sido amplamente aplicada e difundida na academia e na indústria. A estratégia desenvolvida pela empresa japonesa foi uma resposta às restrições de recursos humanos, técnicos e de matérias-primas, e às pressões competitivas globais enfrentadas pelo Japão após a Segunda Guerra Mundial. O grande objetivo da empresa era obter formas de melhorar a eficiência e a qualidade de suas operações enquanto enfrentava a limitação de recursos (DROHOMERETSKI *et al.*, 2014; ANTONY *et al.*, 2017).

A produção enxuta com a eliminação de desperdícios, foco do *Lean*, derivou-se da necessidade do aumento da velocidade do fluxo de produção, por meio da eliminação de todas as atividades sem valor agregado. A partir deste conceito o *Lean* utiliza uma série ferramentas como por exemplo o Mapeamento de Fluxo de Valor, com o objetivo de identificar e eliminar fontes de desperdício nos processos empresariais (JAYARAM, 2016).

As fontes clássicas de desperdício no *Lean* são transporte, inventário, movimentação, espera, excesso de produção, excesso de processos e desperdícios. Estas fontes geram impactos nas operações e nos custos das organizações, o que as torna menos competitivas perante seus concorrentes (DROHOMERETSKI *et al.*, 2014; ANTONY *et al.*, 2017).

A história do *Six Sigma*, por sua vez, começa em 1970 quando uma empresa japonesa assumiu a gestão de uma unidade fabril da Motorola. Essa unidade produzia aparelhos de televisão nos Estados Unidos e enfrentava diversos problemas de qualidade em seus processos e produtos. Por essa razão, a empresa japonesa iniciou um grande movimento de mudança em seu processo de gestão da qualidade, o que resultou na melhoria consistente de seus índices de defeito, reduzindo custos e melhorando o seu desempenho operacional e financeiro. Esse resultado foi alcançado usando a mesma mão de obra, tecnologia, equipamentos e práticas operacionais utilizadas anteriormente pelas unidades fabris da Motorola, sinalizando que os problemas de *performance* poderiam estar relacionados aos antigos processos de gestão da empresa (PYZDEK; KELLER, 2023).

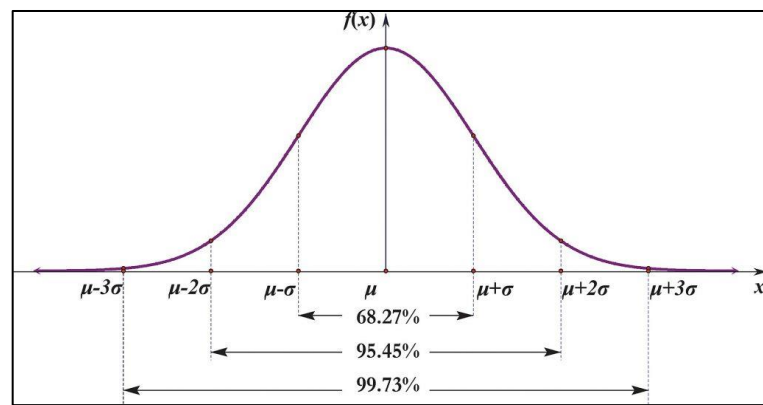
Em meados de 1980 Bob Galvin, então CEO da Motorola, tendo como base a experiência vivida com a gestão da empresa japonesa, iniciou um trabalho inovador visando elevar o nível de qualidade de sua organização. Por meio da utilização de ferramentas consagradas de qualidade e conceitos de gestão, Bob Galvin desenvolveu com sua equipe uma nova estratégia que denominou *Six Sigma* (PYZDEK; KELLER, 2023). Com a nova estratégia a Motorola passou a ser uma referência em qualidade e uma líder global em lucros.

Quando idealizou o nome da estratégia, a intenção da equipe da Motorola era demonstrar em poucas palavras qual a sua abrangência e finalidade. O *Sigma* é uma letra do alfabeto grego e na estatística é utilizada para determinar o desvio padrão de um conjunto de dados, sendo esse

uma medida clássica de variação dentro dos processos industriais. Já o número seis significa o nível de perfeição desejado em um produto ou serviço (CHIARINI, 2011).

Segundo Pyzdek e Keller (2023), o nível de perfeição desejado é um índice para a avaliação da capacidade do processo, o que é alcançado por meio da redução da variabilidade, visando assim, atender às especificações dos clientes. No nível de perfeição *Six Sigma*, um processo tem a média distante simetricamente seis desvios padrões dos limites de especificação, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Nível de Perfeição Six Sigma



Fonte: Adaptado de Pyzdek e Keller (2023).

A Tabela 1 apresenta a distribuição de níveis sigma e os percentuais de conformidade esperados considerando uma tendência de deslocamento de 1,5 desvios-padrão nos processos industriais. Esse deslocamento é chamado tecnicamente de *Shift*.

Estudos realizados na Motorola na década de 1980 constataram que ele é da ordem de 1,5 desvios padrão a partir do centro de uma especificação, sendo então esse valor considerado no cálculo do nível de conformidade (PYZDEK; KELLER, 2023).

Essa convenção passou a ser adotada globalmente por empresas e por pesquisadores, sendo comumente observada nos livros sobre LSS. Todavia, observa-se que a maioria dos livros sobre estatística não apresenta o *Shift* convencionado pela equipe da Motorola, o que, em alguns casos, tem gerado dúvidas entre os novos pesquisadores do tema.

Considerar o *shift* proposto pela Motorola torna o nível de conformidade mais conservador no longo prazo, ou seja, as organizações terão naturalmente uma piora de seus processos ao longo do tempo (PYZDEK; KELLER, 2023).

Tabela 1 – Nível de Conformidade LSS com shift de 1,5 desvios-padrão

Nível Sigma	Conformidade (%)	Defeitos Por Milhão de Oportunidades (DPMO)
1	30,90	697.672
2	69,10	308.770
3	93,30	66.807
4	99,38	6.210
5	99,97	233
6	99,99966	3,4

Fonte: Adaptado de Pyzdek e Keller (2023).

Na Tabela 2 são apresentados os níveis de conformidade considerando um processo com distribuição normal, ou seja, sem a adoção do deslocamento de 1,5 desvios. Este deslocamento proposto pela equipe de melhoria da Motorola não é encontrado na maioria dos livros de estatística, conforme citado anteriormente, estando presente apenas nas publicações voltadas para o tema *Six Sigma*. Observa-se que nos cálculos de capacidade e nível sigma adotados na indústria contemporânea, o *shift* de 1,5 desvios-padrão é amplamente adotado.

Tabela 2 – Nível de Conformidade LSS sem shift de 1,5 desvios-padrão

Nível Sigma	Conformidade (%)	Defeitos Por Milhão de Oportunidades (DPMO)
1	68,26	317.300
2	95,46	45.500
3	99,73	2.700
4	99,9937	63
5	99,999943	0,57
6	99,9999998	0,002

Fonte: Adaptado de Pyzdek e Keller (2023).

O *Six Sigma* e seu nível de conformidade passaram a ser uma referência global para projetos de melhoria em todo o mundo, tornando-se a objeto de estudo em diversas pesquisas científicas ao redor do mundo, o que despertou o interesse de pesquisadores e estudiosos do *Lean Manufacturing*.

O *Lean* e o *Six Sigma* passam a ser estudados e integrados em meados dos anos 2000 com diversos pesquisadores desenvolvendo pesquisas sobre o tema. Observa-se que ambos derivaram de necessidades distintas em momentos diferentes da história. Entretanto, os aspectos sinérgicos entre eles somado a grande similaridade de propósitos, levou-os a um processo de convergência e integração. A produção enxuta, foco do *Lean*, derivou-se da necessidade do aumento da velocidade do fluxo de produção, por meio da eliminação de todas as atividades sem valor agregado. Já o *Six Sigma*, por sua vez, desenvolveu-se a partir da necessidade de melhorar a qualidade de produtos por meio da redução sistemática do número de defeitos (HABIDIN;YUSOF, 2013; ALBLIWI *et al.*, 2014). Sendo assim, o objetivo final, tanto do *Lean*, quanto do *Six Sigma*, é eliminar anomalias nos processos e melhorar o desempenho das organizações por meio de técnicas estruturadas que contribuem com a identificação e com a eliminação de desperdícios e desvios de processo (VIJAYA, 2013).

A combinação das duas estratégias permite que as organizações executem projetos de melhoria que objetivam a eliminação de desperdícios e a redução da variabilidade dos processos (ANTONY, 2011; DROHOMERETSKI *et al.*, 2014; MUSTAPHA *et al.*, 2019), por meio da capacitação e do engajamento dos colaboradores, aperfeiçoamento dos controles internos, implantação de sistemas a prova de falha e melhoria da acuracidade na projeção dos ganhos financeiros (JULIANI; OLIVEIRA, 2017; MCDERMOTT *et al.*, 2021).

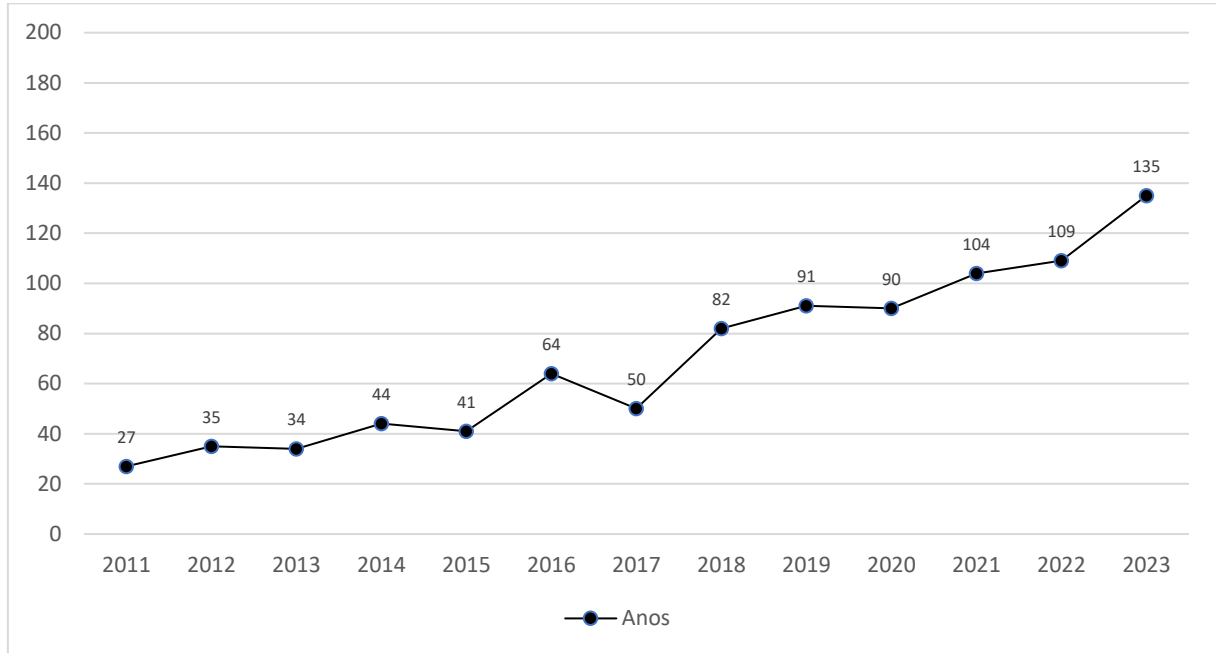
Essa combinação permite ainda que as organizações se concentrem na satisfação dos clientes, na agregação de valor aos produtos e na eliminação das causas dos desvios, o que conduz as empresas para a redução sistemática de defeitos nos processos. Nesse cenário de busca constante pela melhoria, as organizações industriais podem implementar controles adequados e robustos em todas as etapas de seus processos produtivos, o que contribuirá com a criação de uma cultura interna orientada para a melhoria contínua (ANTONY *et al.*, 2019).

O LSS nasce então da combinação do *Lean* e do *Six Sigma*, sendo mundialmente reconhecido como uma estratégia para o desenvolvimento organizacional e consolidação do processo de melhoria contínua (SUNDER; ANTONY, 2018; RODGERS; ANTONY, 2019). Antony (2011) cita que a integração permitiu criar uma estratégia que fornece conceitos, métodos e ferramentas para a condução de processos de mudança, sendo considerado um instrumento eficaz de liderança e de melhoria.

O LSS é considerado também como uma estratégia eficaz de melhoria contínua que visa maximizar valor para os acionistas, melhorando a qualidade e adicionando maior rapidez aos processos, com o objetivo de trazer maior satisfação aos clientes e reduzir os custos (CORBETT, 2011; ANTONY *et al.*, 2017).

Nos últimos anos observa-se um crescimento no número de publicações científicas sobre o tema, o que indica o interesse crescente da academia pelo tema, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Produção científica sobre LSS no período de Jan/2011 a Ago/2023 na base Scopus



Fonte: Produção do próprio autor.

O LSS tem sido relacionado e estudado com outras temáticas, como por exemplo sustentabilidade, gerenciamento de projetos, economia circular, ciclo PDCA, entre outros temas, o que também tem contribuído com a elevação do número de publicações nos últimos anos (PZDEK; KELER, 2023). No Apêndice C são apresentados os 30 artigos mais citados sobre o LSS no período de Jan/2011 a Ago/2023 na base de dados Scopus.

Segundo Santos e Azevedo (2017), quando foi idealizado, o *Six Sigma* tinha foco em aplicações do segmento industrial. Todavia, ao longo dos anos, esse cenário passou por grandes transformações. Segundo os autores, os artigos publicados a partir de 2011 evidenciam que as aplicações passaram a ocorrer também nos setores de serviços, saúde, finanças e logística, entre outros, conforme apresentado no Quadro 1.

Na indústria, conforme já citado anteriormente, o LSS tem sido amplamente utilizado para melhorar a eficiência dos processos produtivos e a qualidade dos produtos. No setor de serviços tem sido aplicado em larga escala para aperfeiçoar os processos administrativos, reduzir o tempo de espera e aumentar a satisfação dos clientes. Na saúde tem sido utilizado para melhorar a qualidade dos atendimentos aos pacientes (MASON *et al.*, 2015), na área financeira para melhorar os processos de análise de crédito e reduzir os riscos de inadimplência (CHENG;

CHANG, 2012), e por fim, na logística, tem sido utilizado para melhorar a eficiência dos processos de armazenagem, expedição e distribuição (KASPAR; SCHNEIDER 2015).

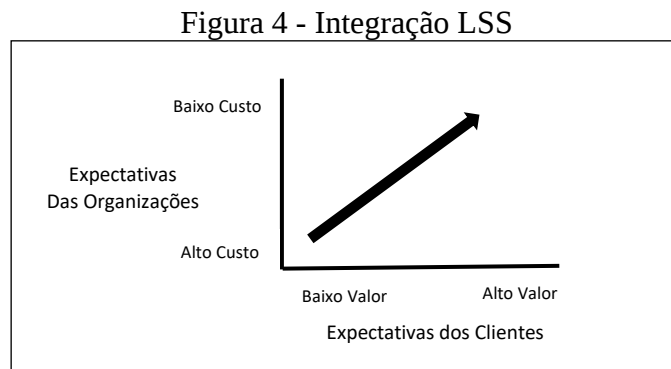
Quadro 1 – Temas nos 30 artigos mais citados sobre LSS entre 2011 e 2020

TEMAS	AUTORES
<i>Green Lean Six Sigma</i> e Sustentabilidade	BANAWI; BILEC, 2014; GARZA-REYES, 2015; CHERAFFI <i>et al.</i> , 2016; KUMAR <i>et al.</i> , 2016; CHERAFFI <i>et al.</i> , 2017; CHUGANI <i>et al.</i> , 2017
LSS na área da saúde	CIMA <i>et al.</i> , 2011; CHIARINI 2012; LAUREANI <i>et al.</i> , 2013; BHAT <i>et al.</i> , 2014; MASON <i>et al.</i> , (2015)
Fatores Críticos de Sucesso na aplicação do LSS	HILTON; SOHAL 2012; ANTONY <i>et al.</i> , 2012B; HABIDIN; YUSOF 2013; NÄSLUND 2013; ALBLIWI <i>et al.</i> , 2014
Vantagens da utilização conjunta do <i>Lean</i> e <i>Six Sigma</i>	ANTONY, 2011; DROHOMERETSKI <i>et al.</i> , 2014
LSS em instituições de ensino superior	ANTONY <i>et al.</i> , 2012A; ANTONY, 2014; SVENSSON <i>et al.</i> , 2015
Aplicação do LSS em pequenas e médias empresas	TIMANS <i>et al.</i> , 2012; LANDE <i>et al.</i> , 2016
Revisão sistemática da literatura	ALBLIWI <i>et al.</i> , (2014); MASON <i>et al.</i> , 2015; YADAV 2016; CHUGANI <i>et al.</i> , 2017
Aplicação do LSS na área de serviços	PSYCHOGIOS <i>et al.</i> , 2012
Contribuições do LSS para a excelência operacional	CORBETT, 2011; ANTONY <i>et al.</i> , 2017
Comparativo do LSS com o <i>Total Quality Management</i> (TQM) and <i>Business Process Reengineering</i> (BPM)	CHIARINI, 2011

Fonte: Produção do próprio autor

Ao longo dos anos o LSS evoluiu e passou a fazer parte dos sistemas de gestão de muitas organizações ao redor do mundo. Essa integração envolve mudanças culturais, treinamentos e engajamento dos colaboradores, além de um acompanhamento muito próximo das atividades junto ao pessoal operacional, possuindo características comuns, tais como ênfase na satisfação do cliente, busca pela qualidade, emprego de ferramentas consagradas de qualidade e aplicação de conceitos estatísticos para monitoramento e controle dos processos, produtos e serviços (MALEYEFF *et al.*, 2012).

A Figura 4 ilustra que as expectativas das organizações e de seus clientes são atendidas simultaneamente a partir do LSS, com a redução dos custos operacionais, ao passo que se obtém a melhoria da qualidade e a agregação de valor aos produtos e aos serviços.



Fonte: Adaptado de Maleyeff *et al.*, 2012

Do ponto de vista das organizações empresariais, sempre existirá a necessidade da redução dos custos operacionais, o que torna a maximização dos resultados financeiros um dos principais objetivos destas organizações. Por outro lado, o cliente sempre terá expectativas quanto à agregação de valor, de forma que sejam percebidos os benefícios na compra dos produtos e dos serviços. Quando ambos os pontos de vista são combinados, a organização passa a trabalhar com foco na redução dos custos e na maximização dos resultados financeiros, sendo este um dos objetivos do LSS (JULIANI; OLIVEIRA, 2017).

A estratégia LSS utiliza uma abordagem estruturada que auxilia os gestores na identificação das fontes de desperdício e na identificação da variação dos processos, impactando positivamente na produtividade na eficiência e consequentemente nos resultados financeiros das organizações (LAUREANI; ANTONY, 2012). Em sua aplicação o LSS disponibiliza um conjunto de ferramentas que ajudam as empresas no planejamento, no levantamento, na análise de dados, na identificação de problemas, na definição e na priorização de ações de melhoria (CHIARINI, 2011; ANTONY *et al.*, 2017).

Na execução de projetos LSS, utiliza-se o DMAIC, cujas letras representam as fases dos processos de melhoria: definir, medir, analisar, implementar e controlar. Ele auxilia as empresas na estruturação, na execução e no monitoramento dos processos de melhoria. A sua utilização é um grande diferencial da estratégia LSS, pois contribui com a sistematização das ações de melhoria a partir de um disciplinado e rigoroso processo de gestão de projetos (ULUSKAN, 2019).

Cada fase do DMAIC deve ser executada dentro de um cronograma detalhado, que envolve a utilização de conceitos e ferramentas da qualidade. Os processos de melhoria contínua devem ter bons mecanismos de medição, de avaliação e de monitoramento, levando sempre em consideração as necessidades e as preferências dos clientes (KENNEDY, 2012). O Quadro 2 ilustra as fases do DMAIC, detalhando o significado e o objetivo de cada uma.

Quadro 2 – DMAIC

FASES	OBJETIVOS
DEFINIR	Definir claramente o problema, ou a oportunidade, e os objetivos do projeto; Executar o planejamento macro do projeto; Definir as variáveis de entrada e saída do projeto.
MEDIR	Avaliar o Sistema de Medição existente e coletar os dados das variáveis.
ANALISAR	Determinar as causas fundamentais para os problemas prioritários; Identificar formas de eliminar a lacuna entre o desempenho atual e o objetivo.
IMPLEMENTAR	Propor, avaliar, implementar soluções para os problemas ou oportunidades.
CONTROLAR	Controlar e garantir a manutenção dos resultados.

Fonte: Adaptado de Antony (2017).

A estrutura do DMAIC estimula o pensamento criativo e o desenvolvimento de soluções para problemas voltados aos processos, aos produtos e aos serviços. Além disso, ele permite que as organizações identifiquem os problemas de forma estruturada, quantificando-os e analisando-os, antes da implementação das ações de melhoria. A fase de controle garante que as melhorias sejam mais assertivas e possam contribuir com o atingimento das metas estabelecidas. O DMAIC é fundamental para a implementação do LSS.

O DMAIC é antecedido por uma fase de seleção e priorização de projetos cuja execução é fundamental para o sucesso do LSS. Esta seleção determina quais serão os projetos de melhoria executados pela empresa, quem serão os responsáveis e quais serão as metas de melhoria (NALLUSAMY, 2023). Nesse contexto é comum que anualmente as empresas promovam reuniões para indicar e selecionar os projetos prioritários para suas organizações, destacando em cada departamento, quais serão os *belts* responsáveis pela liderança desses projetos.

A aplicação do DMAIC nas empresas é favorecida pelas características do LSS. Estas características incentivam a aplicação do DMAIC de forma estruturada, ajudando as empresas na melhoria de seus processos. O Quadro 3 apresenta características do LSS identificadas na literatura científica.

Quadro 3 – Características do LSS

CARACTERÍSTICAS	AUTORES
Foco na eliminação de desperdícios e redução de variabilidade	LAUREANI; ANTONY, 2012; JAYARAM, 2016; ARCIDIACONO; PIERRONI, 2018; CHIARINI; KUMAR, 2021
Busca implantar uma cultura orientada para melhoria	ANTONY, 2011; KENNEDY, 2012; DROHOMERETSKI <i>et al.</i> , 2014
Busca implantar controles e sistemas a prova de falha	SANDERS <i>et al.</i> , 2016; DOMBROWSKI; RICHTER, 2016; DOMBROWSKI <i>et al.</i> , 2017; TORTORELLA; FETTERMANN, 2018
Objetiva a formalização de trabalhos padronizados	LAUREANI; ANTONY, 2012; SANDERS <i>et al.</i> , 2016; DOMBROWSKI; RICHTER, 2016; DOMBROWSKI <i>et al.</i> , 2017;
Utiliza ferramentas estatísticas e de qualidade para melhoria dos processos	LAUREANI; ANTONY, 2012; PATYAL; MADDULETY, 2015; SANDERS <i>et al.</i> , 2016;
Objetiva a implantação de manufaturas de fluxo contínuo e produção puxada	VIJAYA, 2013; HABIDINYUSOF, 2013; ALBLIWI <i>et al.</i> , 2014
Tem foco na criação de valor	SNEE, 2010; LAUREANI; ANTONY, 2012; HABIDINYUSOF, 2013; ALBLIWI <i>et al.</i> , 2014
Implementada a partir de um corpo de especialistas	PYZDEK; KELLER, 2023; KENNEDY, 2012; LAUREANI; ANTONY, 2012

Fonte: Produção do próprio autor.

Quando criou o conceito *Six Sigma*, a Motorola identificou a necessidade de capacitar de forma diferenciada os profissionais responsáveis por liderar as equipes de melhoria, necessitando esses profissionais de um elevado nível de proficiência na aplicação das técnicas e ferramentas da qualidade (PYZDEK; KELLER, 2023).

Nesse cenário a Motorola criou um programa de capacitação específico para treinar esses profissionais, passando a classificá-los como *Belts*. Dentro da classificação proposta pela Motorola observam-se os *Master Black Belts*, *Black Belts*, os *Green Belts*, os *Yellow Belts*, e os *White Belts*. O Quadro 4 apresenta as atribuições desses profissionais.

A partir do programa de capacitação criado pela Motorola diversos outros programas de certificação foram desenvolvidos ao redor do mundo. Esses programas foram criados para

validar o processo de formação dos profissionais envolvidos com o LSS, não existindo até o presente momento, um padrão mundial de certificação (LAUX; FRANZE, 2010; LAUREANI; ANTONY, 2012).

Quadro 4 – Atribuições dos Belts

	<i>Belts</i>	Nível	Atribuições
ESPECIALISTAS	<i>Master Black</i>	<i>Staff</i>	Assessora o Sponsors atuando como mentor dos <i>Black Belts</i> .
	<i>Black</i>	<i>Staff</i>	Lidera as equipes de projeto multifuncionais ou funcionais, em projetos corporativos, atuando também na capacitação.
	<i>Green</i>	<i>Staff</i>	Lidera equipes de projetos multifuncionais, em projetos departamentais, e participa de equipes lideradas por <i>Black Belts</i> .
	<i>Yellow</i>	Supervisão	Supervisiona a utilização do LSS e suas ferramentas por parte dos <i>White Belts</i> . Executa projetos administrativos, ou focados em uma área específica, sendo seus projetos de baixa complexidade e de curto prazo.
	<i>White</i>	Operacional	Realiza ações de melhoria rápida na área onde atua. As ações são caracterizadas como projetos de curto prazo e baixíssima complexidade.

Fonte: Adaptado de Kennedy (2012).

Como consequência da diversidade de programas de certificação, muitas organizações criaram processos internos para certificar seus profissionais (SANTOS; AZEVEDO, 2017). O Quadro 5 apresenta os principais padrões de certificação identificados no mercado.

Quadro 5 – Padrões de certificação

Certificadoras/Padrão	Sobre	Serviços	Fonte
American Society for Quality (AQS)	Comunidade global de pessoas dedicadas à qualidade que compartilham ideias e ferramentas de Qualidade	Treinamentos Certificação	http://asq.org/index.aspx
International Association for Six Sigma Certification (IASSC)	Associação profissional dedicada a ampliar e aprimorar os padrões Lean Six Sigma	Certificação Acreditação	http://www.iassc.org/
The Council for Six Sigma Certification	Organismo de acreditação profissional, que capacita profissionais para formação e Acreditação	Treinamento Certificação Acreditação	http://www.sixsigmacouncil.org/
Association of Technology, Management, and Applied Engineering (ATMAE)	Associação profissional que compartilha tecnologia, gestão e ideias de engenharia	Certificação	http://www.atmae.org/

Fonte: Produção do próprio autor.

Quanto as diversas ferramentas utilizadas no LSS, observa-se que todas são provenientes da qualidade, da estatística e do próprio *Lean Manufacturing*, sendo a grande maioria das ferramentas soluções consagradas e amplamente aplicadas ao longo da história. O Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM) é uma dessas ferramentas. Ele é utilizado para identificação das atividades que agregam, e das atividades que não agregam valor aos processos, a fim de que sejam mapeados, analisados e eliminados os desperdícios dos processos (LAUREANI; ANTONY, 2012). Nesse mapeamento identificam-se a mão de obra utilizada, os tempos de *setup*, os tempos de processamento, os níveis de inventário, e os volumes de produção, entre outras informações, sendo elas fundamentais para a identificação dos pontos de desperdícios (LAUREANI; ANTONY, 2012).

Cartas de controle, Diagrama de Pareto, Análise dos Modos de Falha, Análise de Variância e Regressão, também são ferramentas comumente utilizadas nos projetos de melhoria. A primeira é uma ferramenta para determinar a variabilidade dos processos, a segunda é ferramenta que ajuda a identificar e priorizar causas, a terceira é utilizada para identificar modos de falha em processos e equipamentos, a quarta é uma ferramenta estatística para determinar se as médias de determinados conjuntos de dados são significativamente diferentes, e a quinta é uma ferramenta estatística que permite inferir sobre a relação entre duas ou mais variáveis (LAUREANI; ANTONY, 2012; ANTONY *et al.*, 2017).

A estratégia LSS auxilia as organizações na manutenção de sua competitividade, encorajando os funcionários a executarem projetos de melhoria (JAYARAMAN *et al.*, 2012; BHAT *et al.*, 2014; JNANESH, 2014). Todavia, grandes desafios podem ser observados durante a implementação do LSS (MANTHA; RANE, 2014). Entre esses destacam-se: (i) falta de aderência das práticas LSS aos ambientes empresariais (AZADEGAN *et al.*, 2013), (ii) limitação de resultados quando são utilizadas apenas ferramentas básicas (KOLBERG; ZUHLKE, 2015), (iii) dificuldade de implantação em função de fatores culturais (NETLAND, 2016), (iv) falta de informações confiáveis sobre os processos e (v) falta de experiência das equipes envolvidas na implantação (SANDERS *et al.*, 2016).

Para transpor esses desafios é fundamental que as organizações conheçam e apliquem os princípios do LSS, sendo esses princípios vitais para que seus gestores tenham sucesso na implantação e gestão do LSS. Princípios devem ser compreendidos como parte da cultura de uma organização, sendo praticados por gestores e por profissionais de todos os níveis hierárquicos, uma vez que constituem a base de uma gestão sustentável orientada por resultados e por competitividade (LANDE, 2016; SHOKRI *et al.*, 2016). A Seção 4 deste trabalho

sistematiza os princípios do LSS e contribui com a maior compreensão de seus impactos na implantação e gestão do LSS.

Mesmo com a constatação dos ganhos obtidos pelas empresas a partir da implementação do LSS, é de suma importância que os gestores empresariais sejam pragmáticos e compreendam que não existe nenhuma garantia de êxito na aplicação do LSS, o que torna fundamental a adoção de boas práticas que auxiliem as empresas na implantação de programas que considerem a formação dos *Belts*, a priorização e a seleção de projetos, e principalmente, o apoio da alta direção (YADAV; DESAL, 2016; ANTONY *et al.*, 2019; FLOR VALLEJO *et al.*, 2020).

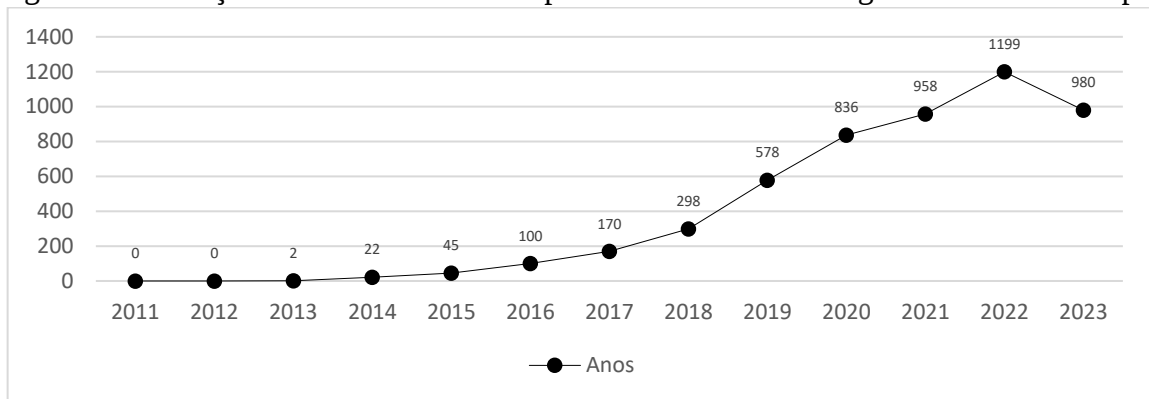
2.2 INDÚSTRIA 4.0

O termo I4 foi definido a partir de uma iniciativa do governo alemão chamado de Indústria 4.0. O objetivo da iniciativa é melhorar a produtividade e a competitividade da indústria alemã a partir da utilização de tecnologias digitais (LIAO *et al.*, 2017; ZHONG *et al.*, 2017; THOBEN *et al.*, 2017). Ela foi cunhada com a participação de representantes da indústria, da academia e do setor público, culminando com uma apresentação conceitual na feira de Hanover no ano de 2011 (DRATH; HORCH, 2014; HOFFMAN; RÜSCH, 2017).

Nessa feira foram apresentados os conceitos e foram lançadas as bases que estão norteando o desenvolvimento dessa importante iniciativa. Após sua criação o termo I4 passou a ser utilizado como um sinônimo que caracteriza a 4ª revolução industrial e a era da digitalização de processos. As outras três revoluções foram respectivamente a invenção da máquina a vapor, a chegada da energia elétrica e o desenvolvimento da computação (HOFFMAN; RÜSCH, 2017; LIU; XU, 2017; LIAO *et al.*, 2017).

A I4 pode ser definida como a combinação de tecnologias digitais para a criação de soluções tecnológicas que integram processos físicos e virtuais, visando o aumento da produtividade das organizações e à melhoria da qualidade de vida da sociedade (ZHONG *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018). Ela tem despertado o interesse da academia, o que pode ser observado pelo aumento crescente da produção científica sobre o tema, conforme observado na Figura 5. No Apêndice D, são apresentados os 30 artigos mais citados sobre o tema no entre Jan/2011 e Ago/2023 na base de dados Scopus.

Figura 5 – Produção científica sobre I4 no período de Jan/2011 a Ago/2023 na base Scopus



Fonte: Produção do próprio autor.

Em sua essência a I4 é resultado da automação e dos avanços tecnológicos em processos produtivos, da combinação de TICs, da utilização da internet, e do uso de máquinas e produtos inteligentes (LASI; KEMPER, 2014). Somados estes elementos criam o conceito de *smart network manufacturing*, no qual as máquinas e produtos interagem de forma segura uns com os outros, sem interferência humana, o que aumenta a produtividade, reduz a ocorrência de erros operacionais e aumenta a lucratividade das empresas (IVANOV *et al.*, 2016).

Observa-se que a literatura científica apresenta diversas definições sobre a I4. Por exemplo, alguns autores afirmam que ela pode ser definida basicamente como a integração de dispositivos digitais, *softwares* e máquinas físicas em rede, incluindo os sistemas de armazenagem e logística, com o objetivo de prever, controlar e planejar as organizações (WANG *et al.*, 2016; LU, 2017). Outros autores como Ganzarain e Errasti (2016) definem a I4 como um conjunto de soluções que extrapolam a utilização e a combinação de tecnologias, e que objetivam melhorar a capacidade produtiva das empresas, visando à obtenção de vantagens competitivas e melhor posicionamento no mercado. Para os autores ela é considerada a aplicação de um conjunto de tecnologias emergentes que levam as empresas para um novo patamar de operação e de gestão, viabilizando o gerenciamento integrado de toda a cadeia de valor e o atendimento das expectativas dos clientes.

Lu (2017) define a I4 como um processo integrado de manufatura, adaptado, otimizado, orientado, interoperacional e voltado a serviços. Sommer (2015) cita que a I4 é a utilização de produtos com capacidade de interagir de maneira autônoma com equipamentos inteligentes e sistemas computacionais por meio de rádio frequência (RF). Nesta interação, segundo o autor, os produtos, equipamentos e sistemas computacionais trocam informações como a sequência de produção, matérias-primas a serem utilizadas, necessidade de recursos e receitas de produção, entre outras informações.

Na literatura científica observam-se outras definições interessantes sobre a I4, o que caracteriza a amplitude e a abrangência do tema. Essas definições são carregadas de termos técnicos e de características muito particulares que ilustram as especificidades dessa iniciativa. Algumas destas características são: i) soluções orientadas a serviços por meio de arquiteturas de sistemas baseadas na internet, ii) sistemas autônomos com funções de tomada de decisão descentralizada, e iii) sistemas capazes de se conectar e se comunicar com outros dispositivos e elementos físicos ligados a uma rede industrial (LASI *et al.*, 2014; VOGEL-HEUSER; HESS, 2016).

Outras características igualmente importantes da I4 encontradas na literatura científica são: i) possui sistemas com habilidade para adaptação a novas demandas; ii) viabiliza a otimização de processos de manufatura com base em algoritmos inteligentes; e iii) implementa modelos de dados padronizados e comunicação segura, o que permite o compartilhamento de informações em nuvem (VOGEL-HEUSER; HESS, 2016). O Quadro 6 apresenta um conjunto de características da I4 identificados na literatura científica.

Quadro 6 – Características da I4

CARACTERÍSTICAS	AUTORES
Foco na melhoria da produtividade	BUSCHER; BORGER, 2017; DOMBROWSKI <i>et al.</i> , 2017; TORTORELLA; FETTERMAN, 2018
Apresenta soluções orientadas a serviços por meio de arquiteturas de sistemas baseadas na internet	LASI <i>et al.</i> , 2014; VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; 2014; GHOBAKHLOO; FATHI, 2020
Utiliza sistemas autônomos com funções de tomada de decisão descentralizada	SANDERS <i>et al.</i> , 2016; VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; LASI <i>et al.</i> , 2014; THOBEN <i>et al.</i> , 2017
Implementa sistemas capazes de se conectar e se comunicar com outros dispositivos	LASI <i>et al.</i> , 2014; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; IVANOV <i>et al.</i> , 2016; XU <i>et al.</i> , 2018
Viabiliza a otimização de processos de manufatura com base em algoritmos inteligentes	VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; QUASDORF; BRACHT, 2016; ENKE <i>et al.</i> , 2017; RÖBLER; HASCHEMI, 2017
Implementa sistemas com habilidade para adaptação a novas demandas	ENKE <i>et al.</i> , 2017; RÖBLER; HASCHEMI, 2017; TORTORELLA; FETTERMAN, 2017; THOBEN <i>et al.</i> , 2017
Implementa modelos de dados padronizados e comunicação segura, permitindo o compartilhamento de informações em nuvem	DOMBROWSKI; RICHTER, 2016; DOMBROWSKI <i>et al.</i> , 2017A, POKONI <i>et al.</i> , 2017

Fonte: Produção do próprio autor.

Por seu potencial de impactar a vida cotidiana da sociedade, a I4 tem atraído a atenção dos governos, academia e empresas, abrindo caminho para a criação de inovações tecnológicas que permitem a viabilização das fábricas e governos inteligentes, as chamadas *smart factories*

e *smart governments* (LI *et al.*, 2015). Para Bauer (2015), a I4 é um sistema sociotécnico que altera a essência do relacionamento humano e as relações entre as empresas e seus *stakeholders*. As tecnologias utilizadas na I4 têm potencial para provocar mudanças estruturais em várias áreas da sociedade e seus impactos já podem ser observados em diversas empresas e culturas ao redor do mundo (GRAVAGNUOLO *et al.*, 2019).

Por meio de tecnologias digitais a I4 pode beneficiar as empresas e contribuir com aspectos como automação inteligente de processos (THEORIN *et al.*, 2015), consumo eficiente de energia (WANG *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016b; THOBEN *et al.*, 2017), descentralização de operações (LASI *et al.*, 2014), customização em massa (POSADA *et al.*, 2015; ZHONG *et al.*, 2017), maior colaboração e integração entre processos (LEE *et al.*, 2015; ROBLEK *et al.*, 2016) e maior transparência entre os diversos setores das empresas (DRATH; HORCH, 2014; WANG *et al.*, 2016b).

Ela pode contribuir ainda com a flexibilização das linhas de produção (ZAWADZKI; ZYWICKI, 2016; HOFMANN; RÜSCH, 2017; XU *et al.*, 2018), com a maior conectividade e mobilidade entre os sistemas (WOLLSCHLAEGGER *et al.*, 2017), com a melhoria da eficiência dos processos (LEE *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2018), com o compartilhamento de dados (SCHLECHTENDAHL *et al.*, 2014; WAN *et al.*, 2016), com a otimização da cadeia de valor (HOFMANN; RÜSCH, 2017), com a padronização e melhoria da qualidade dos produtos e serviços (WANG *et al.*, 2016b), com a redução dos níveis de emissão de carbono (DRATH; HORCH, 2014), com a redução do tamanho dos lotes de produção (POSADA *et al.*, 2015) e com a redução de custos (WANG *et al.*, 2016b), entre outros.

Segundo os autores Ganzarain e Errasti (2016), esses benefícios modificam e melhoram sobremaneira a maneira como as organizações gerenciam suas operações, projetos e serviços, e municiam os gestores empresariais com informações precisas e qualificadas sobre os processos.

No entanto são observados grandes desafios na implantação da I4. Alguns desses desafios identificados na literatura são a integração das redes industriais considerando os diversos protocolos e soluções existentes (ROBLEK *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2017; Lu 2017), o entendimento, envolvimento e aceite da organização quanto às profundas mudanças geradas em função da utilização das tecnologias digitais (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016), a implantação de mecanismos digitais de negociação entre os diversos dispositivos inteligentes conectados em rede (WANG *et al.*, 2015) e a criação de políticas, diretrizes e soluções técnicas para garantir a segurança dos dados e dos dispositivos conectados às redes industriais (WANG *et al.*, 2015; LU, 2017).

Outros desafios identificados na literatura são a implantação de processos de customização em massa considerando a diversidade de variáveis e aspectos que compõe os processos produtivos (ZAWADZKI; ŻYWICKI, 2016), a integração das diversas e complexas tecnologias que podem estar presentes nos ambientes industriais (LU, 2017), a administração dos altos custos de implementação e de manutenção (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016), a atualização ou a substituição das estruturas de IcT (information and communications technology) e equipamentos industriais não preparados para a digitalização (LIAO *et al.*, 2017), e a capacitação da força de trabalho envolvida na implantação e na manutenção das tecnologias digitais (KANG *et al.*, 2016).

Neste cenário, diante do avanço dos conceitos e das definições sobre a I4, em 2015, o *Boston Consulting Group* (BSG) propôs nove pilares tecnológicos para a viabilização da I4 (RÜßMANN *et al.*, 2015). São eles: i) *Big Data Analytics*, ii) Robôs Autônomos, iii) *Simulation*, iv) *Horizontal and Vertical System integration*, v) *IoT industrial*, vi) *Cybersecurity* (segurança cibernética), vii) *Cloud Computing* (computação em nuvem), viii) Manufatura Aditiva, e ix) Realidade Aumentada. Desde então esses pilares têm sido utilizados como uma das bases para referenciar as tecnologias utilizadas na I4. Destaca-se que outras tecnologias estão sendo incorporadas ao conceito da I4, e que a academia não adota esses pilares como uma verdade absoluta em relação às tecnologias utilizadas na I4 (SANDERS *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2016a). Tecnologias como gêmeos digitais, inteligência artificial e exoesqueleto, entre outras, já são consideradas por muitos autores como parte integrante das tecnologias da I4.

Quanto aos nove pilares propostos pelo BSG, *Big Data* pode ser definido como um conjunto de tabelas digitais armazenadas em dispositivos específicos preparados para receber grandes volumes de dados. Esses dados podem ser analisados por meio de técnicas avançadas de mineração conhecidas como *Data Mining* (WANG *et al.*, 2016a; ZHONG *et al.*, 2017). *Big Data* também pode ser definida como a disponibilização de grandes volumes de dados armazenados a partir de sistemas computacionais, sendo esses dados acessados por meio de técnicas avançadas de busca como *Data Analytics*, o que viabiliza a chamada mineração de dados e a identificação de padrões comportamentais (WANG *et al.*, 2016).

Os *robôs autônomos* são elementos primordiais no conceito das fábricas inteligentes. Esses robôs são equipados com sensores, atuadores e sistemas autônomos (LASI *et al.*, 2014) capazes de realizar autoajuste e autocontrole (THOBEN *et al.*, 2017), e tomada autônoma de decisão (ROBLEK *et al.*, 2016). Os *simulation systems* são soluções que viabilizam a simulação de processos com o objetivo de prever o comportamento de variáveis críticas. Esses sistemas

podem ser combinados com *Virtual Reality Solutions* (VRS), o que pode aumentar o realismo dos processos de simulação (ZAWADZKI; ŻYWICKI, 2016).

Horizontal and vertical system integration são as conexões dos sistemas de IcT em todas as esferas de uma organização. Conexões horizontais representam a integração de todos os departamentos, desde o desenvolvimento de produtos até a expedição, por exemplo (LI *et al.*, 2018). Estas conexões referem-se aos elementos que perpassam os departamentos e os níveis hierárquicos das organizações, sendo estabelecidas a partir da integração dos diversos níveis de dispositivos e sistemas de IcT (LIU; XU, 2017; LI *et al.*, 2018).

Já as conexões verticais perpassam a cadeia de valor e fluxos de dados dentro das organizações, ocorrendo também entre a empresa, seus fornecedores e clientes (PEREIRA; ROMERO, 2017; LIU; XU, 2017). Essas duas conexões, horizontal e vertical, viabilizam ainda uma terceira integração: a *end-to-end integration* (LIU; XU, 2017; LIAO *et al.*, 2017). Ela conecta toda a cadeia de valor em torno de um produto a partir do processo de engenharia, incluindo diferentes empresas (POSADA *et al.*, 2015). Ainda para alguns autores, a *Horizontal and vertical system integration* e *end-to-end integration* podem ser caracterizadas como dimensões habilitadoras do conceito de fábricas inteligentes (PEREIRA; ROMERO, 2017; LIU; XU, 2017; WANT *et al.*, 2016; HOZDIC, 2015).

A *Industrial Internet of Things* (IIoT) é a implementação da *Internet of Things* em ambientes industriais (WOLLSCHLAEGGER *et al.*, 2017). Por meio de sensores de rede wireless, a IIoT conecta dispositivos industriais fisicamente distantes para que eles possam trocar informações em tempo real, a fim de que essas informações sejam utilizadas para a execução dos processos (WAN *et al.*, 2016). A IIoT pode ser definida ainda como a conexão de dispositivos à rede mundial de computadores para troca de dados em tempo real com outros equipamentos e sistemas computacionais (WOLLSCHLAEGGER *et al.*, 2017).

Cybersecurity é uma tecnologia diretamente ligada a aspectos de segurança e integridade de dados (POSADA *et al.*, 2015, XU *et al.*, 2018). Essa tecnologia está relacionada à criação de mecanismos de segurança como criptografia e gerenciamento de usuários. Ela é importante para o sucesso da I4, pois garante a integridade das operações entre os diversos dispositivos conectados às redes industriais e à rede mundial de computadores (XU *et al.*, 2018).

A *Cloud Computing* é um tipo de serviço computacional que oferece servidores, serviço de armazenamento de dados e *softwares* para a gestão de dados (LI; XU, 2016; ZHONG *et al.*, 2017). Nesse serviço, dados e aplicações podem ser armazenados em servidores públicos ou privados instalados em qualquer ponto da rede mundial de computadores. Soluções complexas como por exemplo, sistemas de suporte à tomada de decisão podem ser desenvolvidos

utilizando serviços de computação em nuvem (XU *et al.*, 2018), permitindo que essas soluções possam ser utilizadas de qualquer ponto conectado à rede mundial de computadores. Computação em nuvem pode ser definida ainda como a disponibilização de serviços computacionais na internet, a fim de que empresas e pessoas físicas possam armazenar, acessar e compartilhar dados e aplicativos de qualquer ponto do globo (XU *et al.*, 2018).

A manufatura aditiva é a conversão de modelos 3D digitais em objetivos físicos (OESTERREICH; TEUTEBERGE, 2016). Essa tecnologia é comumente utilizada para a confecção de protótipos e produtos finais específicos, que ainda não estão sendo produzidos em larga escala. A manufatura 3D ocorre de forma prática a partir de impressoras 3D, que utilizam matérias-primas como resina ou plásticos para confecção dos mais diversos produtos (KANG *et al.*, 2016).

A realidade aumentada é uma tecnologia digital que oferece aos projetistas e clientes a possibilidade de interagir virtualmente com produtos e serviços durante o seu desenvolvimento. A aplicação dessa tecnologia viabiliza a criação do conceito *smart design*. Nesse conceito, projetistas podem idealizar, projetar e visualizar com muita precisão como serão fisicamente produtos, construções, *layouts* e ambientes físicos (LASI *et al.*, 2014).

Conforme citado anteriormente, outras tecnologias têm sido amplamente propostas e utilizadas para aplicação na I4. Tecnologias como Inteligência Artificial (WANG *et al.*, 2016; ZHONG *et al.*, 2017), *Machine Learning* (ZHONG *et al.*, 2017), Gêmeos Digitais (TAO e ZHANG, 2017), Exoesqueleto (ROMERO *et al.*, 2016) e *Cyber Physical Systems* (CPS), entre outros exemplos.

A inteligência artificial é uma tecnologia que simula a inteligência humana, utilizando avançados algoritmos e rotinas de programação. Ela permite que os sistemas façam avaliações e tomem decisões baseadas em informações e padrões armazenados em grandes bancos de dados (WANG *et al.*, 2016; ZHONG *et al.*, 2017). *Machine learning* é a utilização de algoritmos para coletar e analisar dados, fazer previsão sobre determinados eventos e treinar esses mesmos algoritmos para que sejam cada vez mais assertivos em suas respostas (ZHONG *et al.*, 2017).

Gêmeos digitais é a replicação virtual de objetos e processos físicos, de modo que a réplica virtual simule seu irmão físico, interagindo com outros objetos e modelos virtuais, e gerando dados em tempo real (TAO; ZHANG, 2017). Exoesqueleto são armaduras robóticas vestidas por seres humanos. Elas têm o objetivo de minimizar esforços físicos e coletar dados em tempo real sobre a movimentação e a localização dos funcionários (ROMERO *et al.*, 2016).

CPS são sistemas projetados e construídos a partir da integração de elementos computacionais, de elementos de rede, e de componentes físicos como sensores e dispositivos robóticos (LU, 2017; XU *et al.*, 2018). Os CPS conectam o mundo real e o virtual utilizando a Internet of THINGS (IoT), Computação em Nuvem e *Big Data*, entre outras tecnologias (ROBLEK *et al.*, 2016). A generalização de sensores somado à aplicação massiva de *softwares* na produção industrial permitiram a integração dos mundos físicos e virtual, o que favoreceu a criação desses sistemas nos ambientes produtivos (SANDERS *et al.*, 2016; LIU e XU, 2017).

Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), *Big Data*, Inteligência Artificial e Mobile Internet (TAO; ZHANG, 2017; Li, 2018), entre outras, são combinadas para digitalizar processos e melhorar os resultados das organizações (WANG *et al.*, 2016b; ZAWADZKI; ZYWICKI, 2016). Essa combinação viabiliza a criação de soluções que automatizam e integram equipamentos e processos, independentemente da distância e da localização geográfica dos equipamentos (TORTORELLA; FETTERMANN, 2017; BUER *et al.*, 2018).

Zawadzki e Zywicki (2016) afirmam que o uso de tecnologias como IoT, CPS e *Big Data*, entre outras, são a base da I4 e permitem criar ambientes de manufatura inteligentes, com maior flexibilidade e eficiência, integrando diferentes atividades e ajudando as empresas na implementação de processos de comunicação mais eficazes. Na I4 as soluções digitais são concebidas para oferecer autonomia aos diversos elementos conectados à rede, permitindo a troca de dados em tempo real entre os processos, e a disponibilização destes mesmos dados para os mais diversos setores da empresa (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; TORTORELLA; FETTERMANN, 2017).

A partir da I4 os equipamentos e produtos conectados às redes industriais e à rede mundial de computadores podem interagir uns com os outros, o que permite a troca simultânea de informações sobre o andamento dos processos (IVANOV *et al.*, 2016). Essa interação promove a cooperação entre esses equipamentos, tornando os ambientes industriais mais adaptáveis, eficientes e integrados (LI *et al.*, 2018).

Esses ambientes criam condições para o desenvolvimento de sistemas computacionais que controlam processos, aproximam as empresas de seus clientes, oferecem praticidade para a compra e avaliação de produtos, e viabilizam o conceito de fábricas inteligentes, o que muda significativamente os modelos de negócio e as formas de consumo (ROBLEK *et al.*, 2016; STRANGE; ZUCHELLA, 2017).

2.3 LEAN SIX SIGMA INTEGRADO À INDÚSTRIA 4.0

O LSS e a I4 têm propósitos complementares, o que viabiliza a sua integração. Nesse contexto observam-se duas grandes oportunidades: i) o LSS contribuir com a I4 na melhoria dos processos antes da digitalização (KASPAR; SCHNEIDER, 2015; BUSCHER; BORGER, 2017), e ii) a I4 contribuir com a aceleração dos projetos LSS, com a confiabilidade da coleta de dados, e com a melhoria dos controles das variáveis críticas de processo (PORKONI *et al.*, 2017; HARTMANN *et al.*, 2018).

A primeira oportunidade refere-se à racionalização da implantação de tecnologias a partir da execução de projetos de melhoria LSS antes da digitalização dos processos. Com essa abordagem, as empresas podem eliminar antecipadamente os desperdícios e maximizar o retorno sobre os investimentos em tecnologias digitais, o que evita que essas tecnologias potencializem os desperdícios e a variabilidade dos processos (BUSCHER; BORGER, 2017; DOMBROWSKI *et al.*, 2017; TORTORELLA; FETTERMANN, 2018).

A segunda oportunidade trata da aceleração dos projetos de melhoria a partir da utilização de tecnologias digitais que viabilizam a coleta automática de dados (LUGERT; WINKLER, 2017; HARTMANN *et al.*, 2018), a melhoria da confiabilidade das informações coletadas (WAN *et al.*, 2016; SONY *et al.*, 2018), a padronização dos processos, a redução dos problemas de qualidade e, conseqüentemente, a melhoria dos controles sobre as variáveis críticas de processo (TSIRONIS; PSYCHOGIOS, 2016).

O LSS integrado à I4 pode criar um círculo virtuoso de melhoria que auxilia as empresas na otimização de seus recursos e na maximização de seus resultados financeiros (BUSCHER; BORGER, 2017). Além disso, observam-se várias possibilidades de integração de tecnologias digitais com ferramentas de melhoria como Cartas de Controle, Mapa de Fluxo de Valor, Diagrama de Causa e Efeito, e Desdobramento da Função Qualidade, entre outras ferramentas da qualidade (ARCIDIACONO; PIERONI, 2018).

As tecnologias digitais podem coletar, processar e disponibilizar dados em tempo real com maior confiabilidade, agilidade e precisão, acelerando os projetos de melhoria LSS. Neste cenário, sensores inteligentes podem capturar e disponibilizar dados dos mais diversos processos em fração de segundos (SONY *et al.*, 2018), sistemas de computação em nuvem e soluções de *Big Data* podem compartilhar grandes quantidades de dados para equipes de projeto LSS geograficamente distantes (DOMBROWSKI *et al.*, 2017a; ARCIDIACONO; PIERONI, 2018; MENDL; BALLE, 2018), e Robôs e demais equipamentos industriais inteligentes

podem receber dados e tomar decisões de forma autônoma com maior agilidade e precisão (SANDERS *et al.*, 2016; BUER *et al.*, 2018).

Além disso a internet das coisas pode conectar os mais diversos dispositivos para que estes também compartilhem informações em tempo real (GHOBAKHLOO; FATHI, 2020), e sistemas de simulação e/ou realidade virtual podem ajudar a prever quais serão os efeitos das melhorias propostas pelas equipes de projeto LSS (LASI *et al.*, 2014; ZAWADZKI; ŻYWICKI, 2016; SANDERS *et al.*, 2016). Por fim, todas essas tecnologias podem ser utilizadas para implementar controles que reduzam as interferências humanas e padronizem os processos, o que aumentará sobremaneira a competitividade das empresas (TSIRONIS; PSYCHOGIOS, 2016).

Estudos sobre a utilização do LSS combinado com a I4 já não são mais embrionários. Arcidiacono e Pieroni (2018), autores pioneiros na pesquisa sobre o uso combinado do LSS com a I4, propuseram a definição do LSS 4.0. Segundo os autores, a integração do LSS à I4 permite que as empresas industriais se transformem em organizações enxutas e ao mesmo tempo inteligentes, o que gera importante vantagem competitiva. Outros autores como Chiarini e Kumar (2021) identificaram evidências dos benefícios e das vantagens da integração do LSS à I4. Citam os autores que o ambiente *smart* é totalmente favorável ao LSS, pois a maioria das ferramentas utilizadas nessa metodologia dependem de dados confiáveis para a compreensão das causas dos problemas. Para eles, a integridade dos dados e a sua disponibilização em tempo real é uma questão chave e preponderante para o sucesso do LSS.

Entre as ferramentas de melhoria LSS que podem ser beneficiadas pela integração com a I4, está o Mapa de Fluxo de Valor. Essa ferramenta auxilia as equipes de projeto LSS no mapeamento do estado atual dos processos e, principalmente, no estabelecimento do estado futuro. A digitalização por meio da I4 pode acelerar os processos de mapeamento fornecendo uma visualização antecipada dos impactos gerados pelas ações de melhoria, o que aumentará a assertividade das equipes LSS (HARTMANN *et al.*, 2018).

Para que os ambientes fabris sejam mais integrados e inteligentes as empresas industriais precisarão dotar seus equipamentos com capacidade cognitiva, autonomia e poder de decisão. Quando problemas de qualidade e/ou *performance* forem identificados, equipamentos inteligentes poderão interromper suas operações automaticamente, relatar os desvios, analisar as causas raízes e tomar contramedidas que auxiliem as equipes de melhoria LSS (THOBEN *et al.*, 2014; BUER *et al.*, 2018).

Além disso, para serem mais competitivas, as grandes empresas industriais precisam tornar seus ambientes produtivos mais enxutos e otimizados. Esse é um dos objetivos das

equipes de projeto LSS e deve ser um dos alvos das empresas que pretendem criar ambientes produtivos inteligentes.

A tecnologia e a digitalização das fábricas podem influenciar no *design* de produtos e na dinâmica dos sistemas de produção. A produção enxuta e a digitalização somadas podem gerar uma simbiose interessante que afetará positivamente os ambientes fabris e tornará as fábricas cada vez mais enxutas e inteligentes (QUASDORF; BRACHT, 2016).

A criação de fábricas enxutas e inteligentes é um objetivo e uma necessidade emergente para as empresas industriais que precisam se destacar perante a concorrência. A combinação do LSS com a I4 cria as bases para esse objetivo e pode aumentar sobremaneira a competitividade e a lucratividade dessas empresas. Essa combinação pode viabilizar a criação de ambientes fabris mais propícios para a resolução de problemas de qualidade e para resolução de problemas de performance de equipamentos, o que ajudará as empresas no aperfeiçoamento de seus sistemas de qualidade e, conseqüentemente, tornará as equipes de melhoria LSS mais produtivas (ENKE *et al.*, 2017; RÖBLER; HASCHEMI, 2017).

LSS e I4 objetivam aumentar a produtividade e a flexibilidade dos sistemas produtivos (KASPAR; SCHNEIDER, 2015), e a sua utilização combinada pode ser uma estratégia interessante para que empresas industriais tenham sistemas produtivos mais flexíveis e propícios à implantação da customização em massa. A customização em massa tem sido a décadas um objetivo e um grande desafio para as empresas industriais ao redor do mundo (ZAWADZKI; ŻYWICKI, 2016).

Tornar os processos mais enxutos também contribui com esse objetivo e favorece a implantação de tecnologias digitais, ao passo que estas tecnologias, uma vez implementadas, contribuem positivamente na melhoria dos processos, habilitando a rastreabilidade de produtos e processos, aumentando a confiabilidade das informações e, conseqüentemente, aumentando a flexibilidade dos sistemas produtivos (METTERNICH *et al.*, 2017; HARTMANN *et al.*, 2018; SONY, 2018). Por fim, essas tecnologias podem ainda acelerar novos projetos LSS, criando assim, um fluxo virtuoso de melhoria (HARTMANN *et al.*, 2018). Por todo o exposto, observa-se que existem muitas sinergias entre o LSS e a I4, o que pode alavancar os resultados dos projetos de melhoria LSS e tornar mais assertivas as implementações de tecnologias digitais, o que culminará na melhoria da competitividade das empresas.

Por outro lado, algumas dissonâncias também podem ser observadas em relação a integração do LSS à I4, e estas devem mitigadas pelos gestores empresariais (METTERNICH *et al.*, 2017). Algumas tecnologias digitais implementadas na I4 podem tornar os sistemas produtivos complexos em função do número de protocolos de comunicação utilizados, o que

conflita com a visão do LSS de buscar soluções mais simples e enxutas (METTERNICH *et al.*, 2017; TORTORELLA; FETTERMANN, 2017).

O LSS tem um foco muito específico em pessoas e padronização de processos, a partir de ações simples de melhoria que aproveitam e adaptam os recursos existentes. Já a I4, requer altos investimentos em tecnologia e adoção de diversos sistemas de comunicação, o que por sua vez, exigirá elevados investimentos em treinamento, aquisição de equipamentos digitais e itens de reposição (KASPAR; SCHNEIDER, 2015; VOGEL-HEUSER; HESS, 2016). Além disso, em muitos casos será necessário realizar a adequação das estruturas de IcT, a fim de que estas habilitem a comunicação entre os diversos sistemas computacionais e os equipamentos no chão de fábrica, o que também exigirá elevados aportes financeiros por parte das empresas (LIAO *et al.*, 2017).

Na I4 as tecnologias digitais precisam de pessoal com alto grau de capacitação para sua implementação e manutenção, o que exigirá elevados investimentos por parte das empresas. Já o LSS incentiva a capacitação da força de trabalho a partir da padronização dos processos, o que em tese, requer menores investimentos, e ações simples direcionadas para a realização da rotina (KANG *et al.*, 2016). Outra dissonância é a gestão dos projetos de implementação da I4 e a gestão dos projetos de melhoria LSS. No primeiro observar-se-á um complexo processo de gestão que envolve implantação e a manutenção das tecnologias digitais em aspectos como capacitação da mão de obra, gestão dos usuários, aquisição de itens de reposição (*spare parts*), e a necessidade de altos índices de disponibilidade dos sistemas, a fim de que os processos não sejam interrompidos. Já no segundo, as ações de melhoria terão como base a utilização dos recursos existentes, foco no conhecimento e na experiência dos funcionários e busca pela simplicidade na proposição das soluções (METTERNICH *et al.*, 2017; SONY, 2018).

A complexidade e o número de protocolos de comunicação existentes em algumas soluções da I4 também conflitam com a visão de simplicidade disseminada pelo LSS. A gestão e a manutenção das soluções que utilizam esses protocolos dependerão de profissionais com conhecimento técnico elevado e investimento em equipamentos sobressalentes, conforme citado anteriormente, além de uma apurada rotina de manutenção preventiva e preditiva (SANDERS *et al.*, 2016). O LSS e a I4 são de fato complementares e tem uma similaridade de propósitos, objetivando a melhoria da competitividade das empresas. Todavia, conforme exposto nos parágrafos anteriores, é preciso considerar que cada uma destas estratégias tem propostas distintas para atingir esse objetivo. Enquanto o LSS preconiza a simplicidade, a I4 propõe a utilização de diversas tecnologias digitais, que elevaram o nível de complexidade das operações.

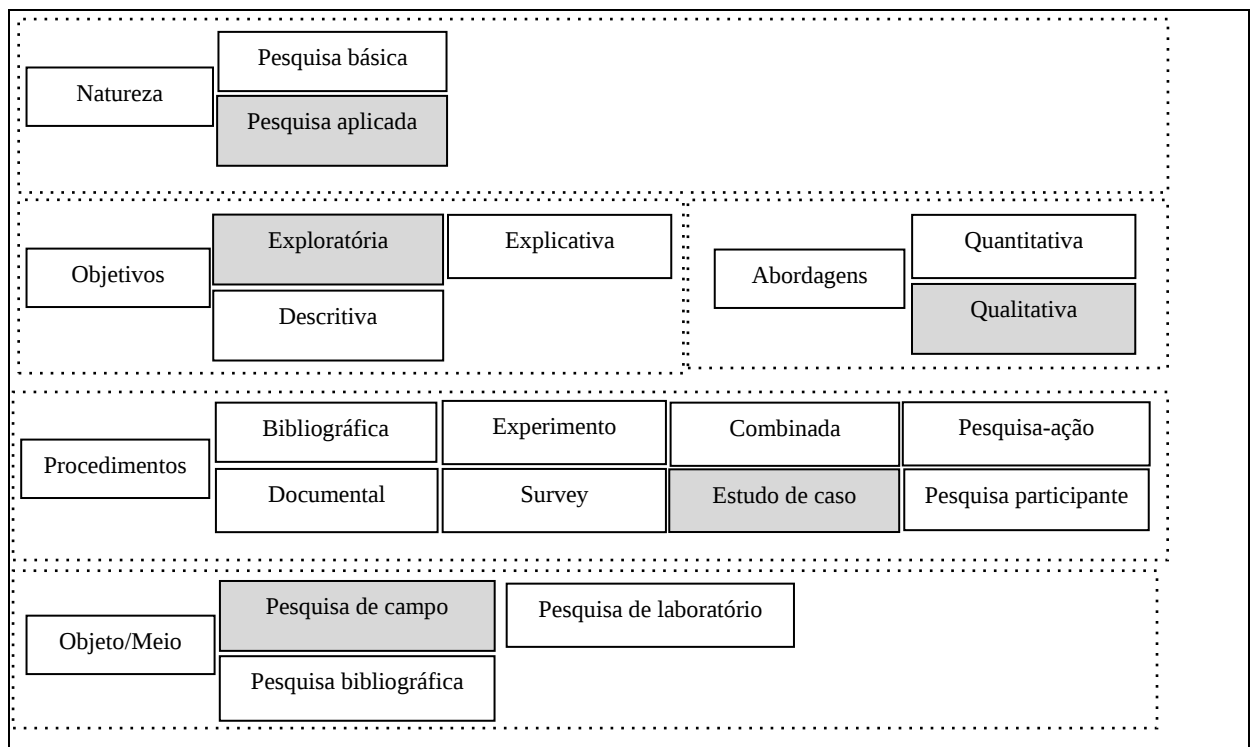
3 MÉTODO DE PESQUISA

Nesta seção são apresentadas a classificação, as etapas de execução, os instrumentos de coleta de dados, e por fim, o protocolo e o cronograma de execução deste trabalho. Segundo Yin (2018), o método de pesquisa é fundamental para a execução de trabalhos científicos e pode ser definido como uma abordagem sistemática e estruturada para coletar e analisar dados com o objetivo de responder uma questão de pesquisa. O autor enfatiza a importância do rigor na elaboração do método de pesquisa, destacando que a escolha do método adequado é essencial para a validade e confiabilidade dos resultados. Segundo ele, um método bem definido permite aos pesquisadores a obtenção de importantes insights sobre o tema estudado e uma maior compreensão de fenômenos em contextos específicos.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa científica pode ser classificada quanto à sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos (YIN, 2018). A Figura 6 apresenta as possibilidades existentes para classificação de pesquisas científicas, com destaque para os itens pertinentes ao presente trabalho.

Figura 6 - Classificação da pesquisa com destaque para os itens aplicados ao presente estudo



Fonte: Elaborado com base em Yin (2018).

A pesquisa realizada neste trabalho pode ser classificada como aplicada em relação à sua natureza, pois está voltada para o desenvolvimento de novos métodos orientados para as necessidades da sociedade. Pesquisas aplicadas são focadas no diagnóstico e identificação de problemas, e buscam propor soluções que respondam as demandas do mercado, o que pode contribuir com o desenvolvimento da sociedade (THIOLLENT, 2011).

No tocante aos objetivos, a pesquisa é classificada como exploratória. Segundo Kothari e Garg (2014), esse tipo de pesquisa visa dar maior clareza aos problemas por meio da construção de hipóteses, o que torna esses problemas mais explícitos e contribui com a efetividade das pesquisas.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa é um estudo de caso múltiplo. Segundo Yin (2018), um estudo de caso pode ser considerado uma investigação de um evento gerado dentro do contexto da vida real. Para o autor, estudos de caso são os procedimentos mais escolhidos quando o objetivo é responder questões relativas a “como” e “por que”. Cita também o autor que esse procedimento deve ser utilizado quando o pesquisador possui pouco controle sobre os eventos.

Em relação a sua abordagem, a pesquisa é qualitativa, pois parte de dados reais obtidos em diversas fontes bibliográficas, sendo esses analisados de forma indutiva, sem utilização de ferramentas e técnicas estatísticas, com vistas a obter compreensão dos contextos nos quais os dados estão inseridos (YIN, 2018).

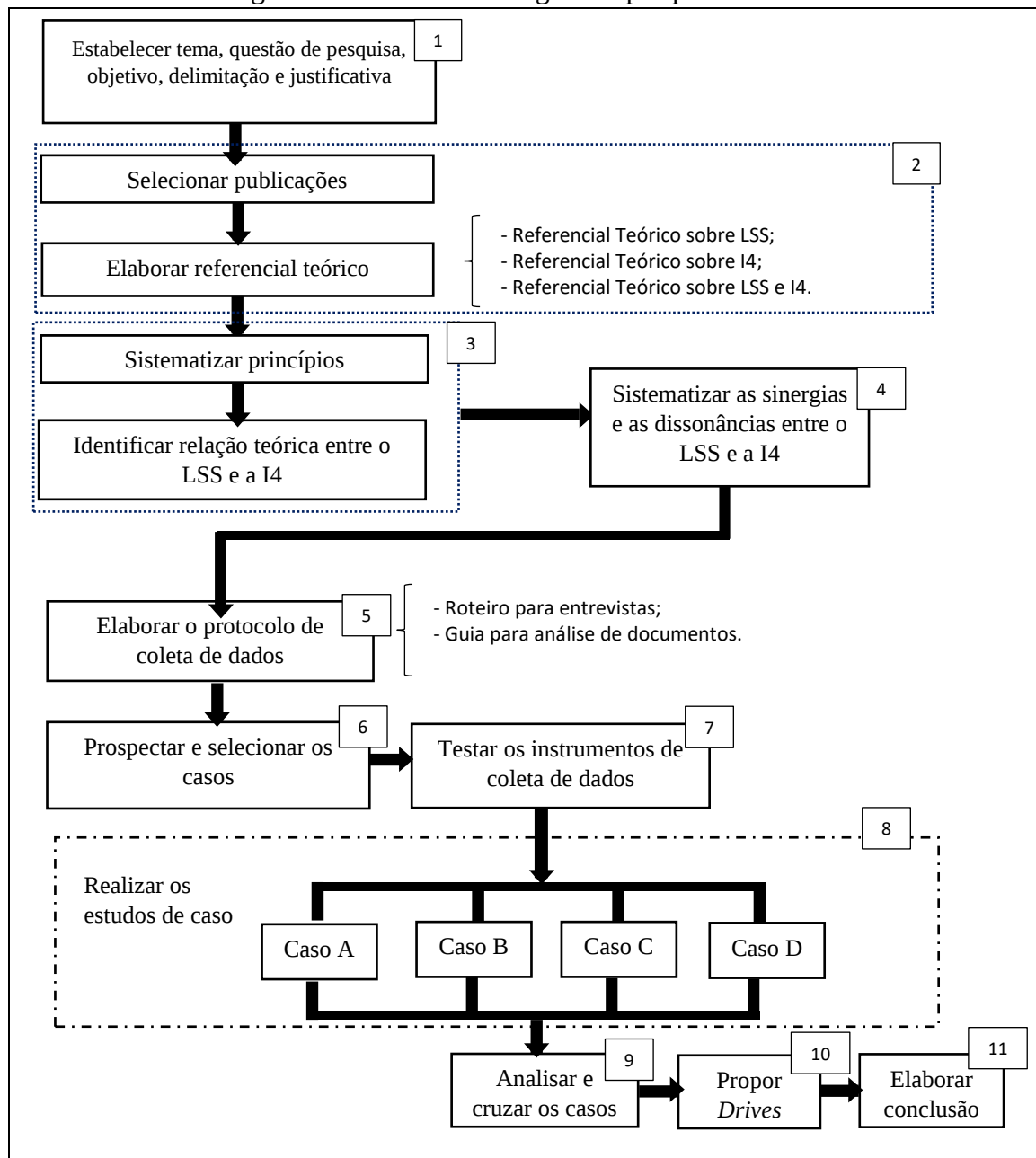
Em relação aos métodos, a pesquisa pode ser caracterizada como uma pesquisa de campo, pois nela são realizadas observações de situações e fenômenos da vida real, tais como ocorrem. Neste tipo de pesquisa são coletados, registrados e analisados um conjunto de dados referentes ao objeto de estudo, o que auxilia os pesquisadores a evidenciar fatos que corroborem com as hipóteses estudadas (KOTHARI; GARG, 2014; YIN, 2018).

3.2 FLUXO METODOLÓGICO

Neste tópico apresenta-se o fluxo metodológico utilizado pelo pesquisador para o desenvolvimento da pesquisa. Esse fluxo foi fundamental para consecução do presente trabalho, pois forneceu uma estrutura organizada e coesa para a condução do processo investigativo. Ele auxiliou o pesquisador a garantir a qualidade e a confiabilidade do presente trabalho, guiando-o em todas as etapas do processo. Além disso, o fluxo metodológico é fundamental para a replicabilidade do presente estudo por outros pesquisadores.

Segundo Aguinis *et al.* (2017), a replicabilidade pressupõe a possibilidade de outros pesquisadores reproduzirem a pesquisa ao realizarem testes com os mesmos modelos, seguindo os mesmos passos apresentados por um pesquisador em seu fluxo metodológico, em contextos sabidamente diferentes. Kandori (2018) reforça a importância da replicabilidade, citando-a como um fator de credibilidade para trabalhos científicos. Na Figura 7 apresenta-se o fluxo metodológico do presente trabalho, o que permite seguir e replicar o caminho percorrido pelo pesquisador.

Figura 7 – Fluxo metodológico da pesquisa.



Fonte: Elaborado com base em Yin (2018).

Na Etapa 1 foi realizada a definição do tema, da questão de pesquisa, dos objetivos, da delimitação e da justificativa. Essa etapa foi concluída durante o período inicial do trabalho e foi crucial para o planejamento e criação do plano de trabalho do pesquisador.

Na Etapa 2 foi selecionada a base científica Scopus, e nela identificados um conjunto de artigos sobre os temas estudados. A base Scopus foi selecionada em função de sua abrangência, relevância no cenário científico internacional e relevância em relação aos temas estudados. Ela é reconhecida como a maior base de trabalhos interdisciplinares da literatura científica mundial na área de engenharia, gestão e tecnologia, entre outras áreas (JEROEN *et al.*, 2020). As buscas na base Scopus foram parametrizadas em função do título dos artigos, período de sua publicação, idioma e tipo de publicação. Para o período foi utilizado o intervalo de 2010 a 2020, para o idioma foi parametrizada a língua inglesa, e para o tipo de publicação foram parametrizados “artigos” e “revisões”. O período de dez anos foi escolhido por contemplar trabalhos que apresentam tendências e padrões atuais sobre o tema estudado e por contemplar abrangente conhecimento sobre estudos passados (Runfola *et al.*, 2017). O idioma inglês foi escolhido por ser o mais utilizado nas publicações científicas e por ser o padrão na maioria dos periódicos internacionais. A partir dessa definição foram realizadas quatro buscas distintas.

A primeira busca utilizou como palavra-chave a expressão “*Lean Six Sigma*” no título dos artigos, e teve por objetivo identificar um conjunto de artigos para embasamento do arcabouço teórico sobre o LSS e corroborar com a sistematização de seus princípios. A pesquisa resultou na identificação de 552 artigos e revisões, sendo os 30 mais citados selecionados e analisados para embasamento da introdução e referencial teórico sobre o LSS (Apêndice E).

Na segunda busca foram utilizadas as expressões “*Industry 4.0*”, “*Smart Factory*”, “*Smart Manufacturing*”, e “*Intelligent Manufacturing*” no título dos artigos. Observa-se que os termos *Smart Factory*, *Smart Manufacturing* e *Intelligent Manufacturing* são utilizados com frequência na literatura científica e são reconhecidos como sinônimo da I4. Para garantir o alinhamento dos termos acima ao objeto de estudo, adicionou-se mais um parâmetro ao critério de seleção: os artigos deveriam conter também a palavra “*Industry 4.0*” entre as palavras-chave, ou conter a palavra “*Industry 4.0*” no *abstract* dos artigos. Como resultado foram identificados 1628 artigos, dos quais foram selecionados os 30 trabalhos mais citados para elaboração da introdução e referencial teórico sobre I4 (Apêndice F).

Na terceira busca foram utilizadas as expressões “*Lean Six Sigma and 4.0*”, “*Lean and 4.0*” e “*Six Sigma and 4.0*” no título dos artigos. Como resultado foram identificados 39 trabalhos, sendo todos analisados a fim de serem identificados os elementos chaves para

composição da introdução, referencial teórico e identificação das relações teóricas entre o LSS e a I4 (Apêndice G).

Na quarta e última busca foram utilizadas as expressões “*Industry 4.0*” no título dos artigos, mais a expressão “*Principles*” no título, abstract e palavras-chave dos artigos. O Objetivo foi identificar trabalhos que já tivessem abordado os princípios da I4 e pudessem contribuir com a sistematização dos princípios propostos neste trabalho de pesquisa, o que resultou na identificação de 2 artigos, sendo estes adicionados à lista de trabalhos selecionados. Destaca-se que no final deste trabalho, após a realização dos estudos de caso, a primeira, segunda e terceira buscas foram atualizadas para o período de 2011 a 2023, com o objetivo de atualizar a introdução e o referencial do presente trabalho com fontes mais recentes (Apêndices B, C e D).

Já na Etapa 3 foram sistematizados os princípios do LSS e os princípios da I4 a partir de uma Análise de Conteúdo em todas as publicações selecionadas na Etapa 2. A Análise de Conteúdo é caracterizada como uma avaliação crítica de documentos com o propósito de identificar as características fundamentais de um texto, com foco na identificação de elementos que permitam inferir sobre um determinado conhecimento (BARDIN, 2011). Na sistematização dos princípios da I4 também foram considerados conceitos e definições apresentados no modelo de maturidade proposto pelo instituto de pesquisa Alemão ACATECH. Esse instituto é reconhecido mundialmente por fazer parte do grupo de trabalho que definiu as bases da I4 na Alemanha. Ainda na Etapa 3 apresenta-se a relação teórica entre os temas LSS e I4 a partir da literatura científica, o que permitiu ao pesquisador compreender o potencial da integração e os aspectos convergentes e divergentes entre o LSS e a I4.

Na Etapa 4 foi realizada a sistematização das sinergias e dissonâncias entre o LSS e I4, a partir do cruzamento de seus princípios norteadores, sendo estas sinergias e dissonâncias validadas por um grupo de especialistas composto por um consultor LSS, um especialista em I4 e um pesquisador no campo da integração do LSS à I4. Na Etapa 5 foi elaborado o Protocolo de Coleta de Dados a partir dos elementos do referencial teórico, sistematização dos princípios, e da sistematização das sinergias e dissonâncias. Esse protocolo foi fundamental para garantia da qualidade das informações coletadas, sendo um guia para realização de entrevistas, análise documental e observações *in loco*, instrumentos importantíssimos para o sucesso do trabalho. O Protocolo de Coleta é apresentado no Apêndice A.

A utilização simultânea e triangulada desses instrumentos aumentou a confiabilidade do trabalho e auxiliou o pesquisador na identificação e interpretação fidedigna da realidade das empresas estudadas (Yin, 2018). Para validar os estudos de caso e garantir sua qualidade, foram

estabelecidos testes e táticas. Para esse fim, considerou-se a validade do constructo, a validade externa e a confiabilidade, conforme propostos por Yin (2018) e ilustrado no Quadro 7.

Quadro 7 – Testes do projeto dos estudos de caso

Teste	Procedimento
1) Validade do constructo	a) Utilizar fontes múltiplas de evidências; b) Encadear as evidências; c) Revisar rascunho do relatório do estudo de caso
2) Validade Interna	Não aplicável a estudos de caso exploratórios.
3) Validade Externa	a) Replicar estudos de caso.
4) Confiabilidade	a) Utilizar protocolo de estudo de caso; b) Desenvolver banco de dados para o estudo de caso.

Fonte: Adaptado de Yin (2018).

A validade interna apresentada no Quadro 7 não é aplicada para estudos de casos exploratórios (Yin, 2018). A validade do constructo auxiliou o pesquisador na adoção de padrões operacionais e na compreensão do objeto pesquisado. A validade externa contribuiu com a lógica de replicação, permitindo o estabelecimento de estudos de caso múltiplos, o que viabilizou a generalização dos resultados obtidos. Já a confiabilidade permitiu que houvesse a reprodutibilidade da pesquisa a partir da criação de um protocolo padrão, de forma que o pesquisador chegasse a resultados semelhantes a partir de diferentes unidades de pesquisa (YIN, 2018).

Após a estruturação do Protocolo de Coleta de Dados, foram definidas as empresas dos estudos de caso, Etapa 6 deste trabalho de pesquisa. No critério de seleção das empresas foram consideradas organizações do segmento industrial, com unidades no Brasil, que já utilizassem o LSS e estivessem implantando ou tivessem implantado a I4. A partir deste critério foram identificadas doze empresas, das quais quatro foram selecionadas por viabilizarem o acesso irrestrito às suas unidades produtivas, liberarem o acesso a seus documentos, permitirem o contato direto com todos os profissionais envolvidos com o LSS e a I4, e demonstrarem interesse em partilhar suas experiências com a academia. O critério utilizado para a definição do número de casos baseou-se em Yin (2018). O autor recomenda um número mínimo de quatro casos para validação de estudos. A validação das empresas dos estudos de caso também é corroborada pela diversidade das organizações selecionadas, as quais possuem diferentes características, como número de funcionários e setor de atuação (CHENG; JOHANSEN, 2016).

As empresas selecionadas pertencem a segmentos industriais considerados essenciais para o desenvolvimento econômico do país: químico, siderúrgico e aeroespacial, sendo essas identificadas por letras do alfabeto (A, B, C, D). O Quadro 8 apresenta as principais características dessas organizações.

Quadro 8 – Caracterização das organizações pesquisadas

Empresas → Características ↓	A	B	C	D
Segmento	Químico	Químico	Siderúrgico	Aeroespacial
Porte	Grande	Grande	Grande	Grande
Número de profissionais no país	4.200	4.500	32.400	1.100
Número de profissionais no mundo	110.000	118.900	45.000	47.900

Fonte: Produção do próprio autor.

Entre as quatro empresas selecionadas, uma foi convidada para participar do estudo de caso piloto a fim de ser realizada a Etapa 7 deste trabalho de pesquisa, o teste dos instrumentos de coleta de dados. Para a escolha dessa empresa utilizou-se como critério a sua proximidade geográfica com a universidade onde a pesquisa está sendo desenvolvida. O estudo de caso piloto visa identificar a necessidade de possíveis adequações no projeto, pois esse pode requerer melhorias, uma vez que novas informações sobre os casos podem surgir (YIN, 2018).

O estudo de caso piloto foi executado por meio de entrevistas, análise documental e observações *in loco* em várias atividades operacionais da empresa A. Entrevista é um instrumento de coleta de dados que ajuda o pesquisador na obtenção de informações e identificação de comportamentos e características dos entrevistados. Ela deve contemplar a estrutura organizacional, os níveis hierárquicos, a formação dos entrevistados, e outras características (MIGUEL; SOUZA, 2012; YIN, 2018). No estudo de caso piloto foram entrevistados gestores e técnicos das áreas de Excelência Operacional (responsável por LSS) e Digital (responsável pela I4). A análise de documentos é um estudo aprofundado de informações do objeto de estudo a partir de um conjunto de registros físicos (YIN, 2018). Por meio dela foram estudados documentos ligados às áreas de Projetos, Qualidade, Excelência Operacional e Digital. Entre o material analisado destacam-se, relatórios de projeto, relatórios operacionais, procedimentos internos, comunicados internos e boletins informativos entre outros documentos.

Já a observação *in loco* ajuda o pesquisador a presenciar a realidade dos fatos, obter novas informações e validar dados obtidos a partir dos outros dois instrumentos. Miguel e Souza

(2012) enfatizam a importância da visita ao local pesquisado para verificar e validar os fenômenos estudados. Dessa forma, foram realizadas visitas na unidade produtiva da empresa para conhecer as áreas de Excelência Operacional, Digital e Produção, o que corroborou com as entrevistas e com a análise dos documentos.

Com a conclusão do estudo de caso piloto, o pesquisador avançou para a Etapa 8 realizando os demais estudos de caso, o que permitiu elaborar os relatórios de cada uma das empresas estudadas. Esses relatórios alimentaram a análise cruzada dos resultados, Etapa 9 desta pesquisa. Nessa etapa o pesquisador teve a oportunidade de compreender os resultados de forma transversal e integrada, comparando as características das empresas estudadas e identificando as boas práticas e dificuldades para implantar o LSS integrado à I4.

Na Etapa 10 foram propostos os *drives* para a implantação do LSS integrado à I4. As informações obtidas nos quatro estudos de caso, somadas a experiência do autor deste trabalho, e as contribuições do grupo de especialistas citados anteriormente, permitiram a proposição de um conjunto de *drives* inéditos com recomendações para a integração do LSS à I4. Por fim, foi redigida a conclusão deste trabalho, Etapa 11.

4 SISTEMATIZAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DO LSS E DA I4

Nesta seção é apresentada a sistematização dos princípios do LSS e da I4, bem como as relações teóricas entre os dois temas. Cabe ressaltar que esses resultados embasaram o desenvolvimento do Protocolo de Coleta de Dados e são a base para a realização dos estudos de caso.

4.1 SISTEMATIZAÇÃO DOS PRINCÍPIOS LSS

Nesta subseção serão apresentados os princípios e os elementos do LSS sistematizados a partir da literatura científica. Mesmo com a constatação dos ganhos obtidos a partir da utilização do LSS, é fundamental que as organizações sejam pragmáticas e compreendam a necessidade da adoção de boas práticas que as ajudem a atingir esse objetivo (YADAV; DESAL, 2016).

Nesse sentido, este estudo sistematizou um conjunto de princípios norteadores do LSS que podem auxiliar as organizações na missão integrar o LSS à I4. Para a sistematização desses princípios foi realizada uma Análise de Conteúdo no conjunto de artigos selecionados na Etapa 2 deste trabalho de pesquisa. A Análise de Conteúdo é caracterizada como uma análise crítica de documentos com o propósito de identificar as características fundamentais de um determinado texto (BARDIN, 2011).

Princípios são caracterizados como parte da cultura das empresas. Eles são praticados em todos os níveis hierárquicos e são considerados a base de uma gestão orientada para resultados (CAMPOS, 2013). Os princípios LSS abrangem o fluxo de informações e todos os recursos orientados para a melhoria contínua, sendo facilmente observados nas áreas que geram maior valor agregado (SNEE, 2010).

Neste trabalho foram sistematizados oito princípios LSS: foco no cliente, desenvolver a liderança, desenvolver a força de trabalho, gerenciar projetos, melhorar continuamente os processos, utilizar ferramentas de melhoria e implementar controles. No Quadro 9 apresentam-se os objetivos e os elementos estruturantes de cada princípio. Esses elementos estruturantes indicam quais requisitos devem ser atendidos para que os princípios sejam de fato estabelecidos nas organizações.

Quadro 9 – Princípios LSS

#	Princípio	Foco	Elementos	Fontes Teóricas
1	Foco no cliente	Entender as necessidades do mercado para atender às expectativas de seus clientes	- Atendimento das necessidades dos clientes; - Relacionamentos de longo prazo.	LEE <i>et al.</i> , 2013; DROHOMERETSKI <i>et al.</i> , 2014 JIMÉNEZ; AMAYA, 2014; BHAT <i>et al.</i> , 2014; SVENSSON <i>et al.</i> , 2015; ANTONY; ABLIWI, 2015; SUNDER, 2015
2	Desenvolver a liderança	Conscientizar e obter o comprometimento da liderança, identificar e desenvolver pessoas com potencial de liderança	- Conscientização da liderança; - Definição de competências; - Avaliação do desempenho da liderança; - Definição de metas de desempenho; - Implementar processos de comunicação; - Eliminação de resistências.	HABIDIN; YUSOF, 2013; ANTONY, 2014; PAMFLIE; FELIZZOLA <i>et al.</i> , 2014; KOWANG <i>et al.</i> , 2016; SHOKR <i>et al.</i> , 2016
3	Desenvolver a força de trabalho	Motivar os funcionários, capacitá-los na metodologia LSS e desenvolver competências para o trabalho em equipe	- Envolvimento e engajamento; - Formação de equipes multidisciplinares; - Seleção adequada; - Capacitação no LSS.	VINODH; GAUTHAM; RAMIYA, 2011; ANTONY <i>et al.</i> , 2012; LEE <i>et al.</i> , 2014
4	Gerenciar projetos	Definir e priorizar projetos de melhoria e utilizar de boas práticas de gerenciamento de projetos	- Seleção e priorização de projetos; - Foco no resultado; - Criação de uma cultura de melhoria.	PSYCHOGIOS; TSIRONIS, 2012; ANTONY <i>et al.</i> , 2012; JAYARAMAN <i>et al.</i> , 2012; MALEYEFF, 2014; SVENSSON <i>et al.</i> , 2015; ARCIDIACONO <i>et al.</i> , 2016
5	Melhorar continuamente os processos	Formar equipes multidisciplinares para mapear os processos identificar oportunidades e implementar ações de melhoria	- Envolvimento da alta direção; - Capacitar e mobilizar a força de trabalho; - Brainstorming e comunicação; - Utilização das ferramentas adequadas.	PSYCHOGIOS; TSIRONIS, 2012; DROHOMERETSKI <i>et al.</i> , 2014; KOWANG <i>et al.</i> , 2016
6	Utilizar ferramentas de melhoria	Utilizar ferramentas de qualidade para execução das ações de melhoria	- Capacitação da força de trabalho; - Combinação com as técnicas de gestão.	JIMÉNEZ; AMAYA 2014; DROHOMERETSKI <i>et al.</i> , 2014; MALEYEFF, 2015;
7	Implementar controles	Implementar rotinas de controle para atuação preventiva sobre as variáveis críticas de processo	- Padronizar processos; - Identificar e controlar variáveis críticas.	PSYCHOGIOS <i>et al.</i> , 2012; GARZA-REYES <i>et al.</i> , 2016; TSIRONIS; PSYCHOGIOS, 2016; KIERAN <i>et al.</i> , 2017

Fonte: Produção do próprio autor.

Esses princípios se complementam e têm relação direta com o sucesso na implantação do LSS. Eles podem ajudar as empresas na criação de uma cultura organizacional de longo prazo orientada para a melhoria contínua, o que contribui com a melhoria da competitividade das organizações. Segundo Snee (2010), os princípios moldam e fortalecem as organizações, criando um ambiente estável e orientado para a melhoria, o que favorece a criação de uma

cultura organizacional no longo prazo. A seguir são apresentados e detalhados cada um dos princípios LSS sistematizados a partir da literatura científica.

4.1.1 Foco no cliente

O foco no cliente exige que as empresas entendam as necessidades do mercado e atendam as expectativas de seus clientes. Manter o foco no cliente ajuda as organizações na definição e na priorização de ações que ajudem a garantir a entrega de produtos e serviços com qualidade, nos prazos e especificações requeridas pelo mercado (JIMÉNEZ; AMAYA, 2014; SVENSSON *et al.*, 2015).

Produtos ou serviços que não atendem às necessidades dos clientes geram retrabalho, atrasos, insatisfação dos clientes e conseqüentemente a perda de mercado (ANTONY; ABLIWI, 2015; SUNDER, 2015). A possibilidade de perder mercado é potencializada pela crescente concorrência e aumento no nível de exigência dos consumidores. Nesse cenário é fundamental que as organizações conheçam e documentem as expectativas de seus clientes e as especificações requeridas para cada um de seus produtos e serviços (LEE *et al.*, 2013).

A implantação e a utilização do LSS alinham a estratégia da organização e as expectativas do mercado com as ações operacionais, melhorando a qualidade, reduzindo custos e melhorando a satisfação dos clientes (BHAT *et al.*, 2014). O entendimento das expectativas e das exigências dos clientes pode nortear a empresa em relação à escolha de técnicas e de ferramentas mais adequadas que contribuam com a melhoria contínua dos processos e, conseqüentemente, com o maior nível de satisfação dos clientes (DROHOMERETSKI *et al.*, 2014).

O LSS ajuda as organizações na eliminação de desperdícios, o que torna os processos mais eficientes desde a produção até o pós-venda, passando pelo relacionamento com os clientes. Manter esse relacionamento é vital para que as organizações se mantenham atualizadas sobre as necessidades do mercado e possam monitorar seus níveis de satisfação (KARIM; ARIFUZ-ZAMAN, 2013).

4.1.2 Desenvolver a liderança

Desenvolver a liderança pressupõe a execução de iniciativas que promovam o comprometimento dos líderes em relação aos projetos de melhoria contínua. A liderança deve estar alinhada e engajada, destacando o maior número possível de funcionários para os projetos

de melhoria, oferecendo os recursos necessários para as equipes de projeto, cobrando resultados e, principalmente, removendo barreiras (CHOI *et al.*, 2012; DESAI *et al.*, 2012; HABIDIN; YUSOF, 2013; ANTONY, 2014).

A organização deve definir as competências necessárias para que a liderança possa cumprir esse objetivo. Além disso, a liderança precisa ser avaliada regularmente para que as metas sejam atingidas e os objetivos estratégicos da organização sejam alcançados. Nesse sentido, metas de desempenho devem ser definidas para viabilizar os processos de avaliação e desempenho da liderança e de seus subordinados (PAMFLIE; DRAGHICI, 2012; FELIZZOLA *et al.*, 2014).

Por fim, a liderança deve estabelecer processos de comunicação, que mantenham o alinhamento da organização. A comunicação é fator preponderante para o sucesso do LSS e para a melhoria contínua. Os líderes devem definir formas de comunicação claras que atinjam todos os níveis da estrutura organizacional, a fim de promover o alinhamento e o compartilhamento de informações sobre as estratégias da organização, sobre os projetos de melhoria e sobre os resultados alcançados (KOWANG *et al.*, 2016).

A liderança tem um papel fundamental no LSS e pode contribuir com as mudanças necessárias para o sucesso de sua implantação e utilização, ajudando também as equipes de projeto LSS na eliminação de eventuais resistências dentro da organização (SHOKRI; WARING; NABHANI, 2016).

4.1.3 Desenvolver a força de trabalho

O desenvolvimento da força de trabalho envolvida direta ou indiretamente com a implantação e com a utilização do LSS deve ser uma das prioridades das organizações. Nesse processo a organização deve envolver o maior número possível de colaboradores. Definidos os métodos de gestão e de implantação, a força de trabalho envolvida diretamente com o LSS deve ser capacitada para liderar os projetos de melhoria LSS (VINODH; GAUTHAM; RAMIYA, 2011).

A formação de equipes multidisciplinares facilita a identificação das causas raízes dos problemas e aumenta a possibilidade de sucesso nas ações de melhoria (THOBEN *et al.*, 2014; BUER *et al.*, 2018). Para isso, os funcionários devem passar por um período de capacitação, seguido por reuniões de alinhamento para a definição dos objetivos e das metas dos projetos de melhoria LSS (THOBEN *et al.*, 2014).

Equipes formadas por funcionários de diferentes setores da organização facilitam a troca de experiência, contribuem com a formação dos funcionários e podem ajudar a evitar problemas recorrentes nos projetos, como por exemplo: a) a não identificação de problemas e de oportunidades de melhoria por uma excessiva familiaridade com os processos, ou b) a não identificação de um problema por desconhecimento dos processos nos quais a melhoria será realizada. Nesse sentido, um balanceamento com pessoas de diversas áreas pode aumentar as possibilidades de sucesso dos projetos de melhoria e contribuir com o processo de formação das equipes multidisciplinares (LEE *et al.*, 2014).

Em relação ao processo seletivo de novos funcionários e/ou funcionários que atuarão nos projetos de melhoria, as organizações devem privilegiar os indivíduos mais criativos, adaptáveis e flexíveis, que tenham perfil para trabalhar em equipe. Por fim, para que possam ter sucesso na implementação e na execução dos projetos LSS, as organizações devem capacitar os funcionários responsáveis pela execução das ações de melhoria. Esses devem receber capacitação em ferramentas de gerenciamento de projetos e ferramentas de melhoria a fim de que possam liderar as equipes envolvidas (ANTONY *et al.*, 2012).

4.1.4 Gerenciar projetos

Os projetos LSS têm algumas particularidades que os diferem de projetos tradicionais. Eles não entregam um produto, mas uma solução. Além disso são executados com o objetivo de remover desperdícios e/ou variações de processos. Assim como os projetos tradicionais eles são temporais e envolvem a utilização de recursos humanos (MEZA; JEONG, 2013). O gerenciamento adequado dos projetos LSS é fundamental e inclui questões como seleção e priorização de projetos, execução de tarefas de melhoria, e o monitorando e a entrega de resultados. Os projetos LSS são focados em ações de melhoria e devem ser liderados por profissionais capacitados e habilitados para gerenciar as ferramentas LSS, liderar as equipes de projeto, gerenciar os processos de melhoria e gerenciar os eventuais conflitos decorrentes desses processos (LERTWATTANAPONGCHAI; SWIERCZEK, 2014).

Dessa forma, as práticas de gerenciamento orientadas às soluções ajudam na priorização de projetos, na integração com *stakeholders* e no desenvolvimento de pessoas. Ferramentas e boas práticas de gestão de projetos devem ser utilizadas pelos líderes dos projetos de melhoria, elevando a possibilidade de êxito no atingimento das metas estabelecidas para cada um dos projetos (ANTONY *et al.*, 2012).

A execução de melhorias por meio de projetos é uma prática válida para quaisquer tipos de organizações que precisem melhorar seus resultados, o que contribui com a criação de uma cultura orientada para a qualidade, alinhando a estratégia organizacional aos objetivos operacionais (PSYCHOGIOS; TSIRONIS, 2012). Além disso, ajudam as organizações a serem mais competitivas, encorajando seus profissionais a se envolverem na resolução de problemas (BHAT *et al.*, 2014; JAYARAMAN; MALEYEFF, 2014).

Quando os projetos de melhoria LSS são complexos, aumenta a necessidade de uma maior capacitação dos profissionais envolvidos e aumenta a necessidade do uso de técnicas e ferramentas mais sofisticada. Por outro lado, se a organização desenvolver e concluir múltiplos e complexos projetos, provavelmente haverá uma evolução técnica das equipes e uma melhoria sistemática dos processos. Por esse motivo, a capacitação adequada da força de trabalho e o suporte da alta administração são extremamente relevantes (SVENSSON *et al.*, 2015).

Por fim, um aspecto crítico na implantação e na gestão do LSS é a execução das ações e o cumprimento dos prazos e das metas estabelecidas. O elevado número de ações oriundas das iniciativas de melhoria pode comprometer o uso adequado dos recursos e atrasar sua execução. Por essa razão a liderança dos projetos de melhoria LSS devem estabelecer rotinas sistemáticas de monitoramento e controle das ações, o que pode ser fator crítico de sucesso na implantação e gestão do LSS (ARCIDIACONO *et al.*, 2016).

4.1.5 Melhorar continuamente os processos

As organizações devem criar uma cultura organizacional orientada para a melhoria contínua, sendo fundamental o envolvimento da alta direção. Quando ocorre esse envolvimento, aumentam as possibilidades de sucesso nos projetos LSS (PSYCHOGIOS; ATANASOVSKI; TSIRONIS, 2012).

A criação dessa cultura passa pela capacitação e pela mobilização dos funcionários envolvidos direta e indiretamente com os processos de melhoria (DROHOMERETSKI *et al.*, 2014). Nesse sentido, as organizações devem promover ações voltadas para o desenvolvimento profissional de seus funcionários, abordando não apenas os conhecimentos técnicos, mas também os valores organizacionais.

O processo de *brainstorming* e a comunicação frequente são elementos importantes para as iniciativas de melhoria contínua e devem ser incentivadas pela liderança (KOWANG *et al.*, 2016). Para que o processo de melhoria contínua promova mudanças significativas nas organizações e sejam alcançados resultados satisfatórios, é necessário que sejam utilizadas

técnicas e ferramentas adequadas, havendo aqui uma relação direta com a capacidade das equipes de melhoria na identificação do melhor ferramental a ser aplicado para cada projeto (DROHOMERETSKI *et al.*, 2014)

4.1.6 Utilizar ferramentas melhoria

As ferramentas de melhoria devem ser utilizadas com proficiência pelas equipes de projeto LSS para que os objetivos da organização sejam alcançados, os desperdícios sejam eliminados e as variações dos processos sejam controladas (JIMÉNEZ; AMAYA 2014; ABUBAKAR *et al.*, 2015).

Para a utilização adequada dessas ferramentas as organizações devem promover a capacitação da força de trabalho envolvida, a fim de que possam liderar os projetos de melhoria LSS. A utilização proficiente das ferramentas LSS pode ser um fator decisivo para que as organizações melhorem seus resultados e consigam implementar uma cultura orientada para a melhoria contínua (DROHOMERETSKI *et al.*, 2014).

A integração das ferramentas de melhoria às técnicas de gestão de projetos é outro fator crítico de sucesso e pode variar de acordo com a complexidade dos projetos. Quanto mais complexos os projetos, maior o grau de complexidade das ferramentas de melhoria utilizadas, e maior o nível de gerenciamento necessário sobre as equipes LSS envolvidas. Nesse contexto, a liderança deve promover reuniões periódicas de *feedback*, manter os cronogramas de atividades periodicamente atualizados, controlar e gerenciar os riscos, estabelecer processos de gestão de mudanças, e disponibilizar informações sobre as ações, metas e indicadores dos projetos em quadros de gestão a vista (ABUBAKAR *et al.*, 2015).

4.1.7 Implementação de controles

A implementação de controles para variáveis críticas de processo é uma ação crucial para manter a robustez dos processos após a conclusão dos projetos de melhoria (CHAKRAVORTY; SHAH, 2012). Para que os controles sejam efetivos, é importante que eles sejam automatizados, o que torna essa ação dependente das equipes de automação e TI, sendo fundamental que integrantes dessas equipes atuem como membros dos projetos LSS (PSYCHOGIOS *et al.*, 2012). A partir da implementação desses controles as empresas têm condições favoráveis para padronizar seus processos e controlar as variáveis críticas, garantindo a uniformidade e a conformidade na execução das operações, o que pode contribuir

preventivamente com a redução dos problemas de qualidade (TSIRONIS; PSYCHOGIOS, 2016).

Além disso, as empresas podem criar soluções automatizadas para corrigir os eventuais desvios, agindo assim preventivamente (LEE *et al.*, 2013; BHAT *et al.*, 2014; GARZA-REYES *et al.*, 2016). Variáveis críticas devem ser identificadas e controladas para que as organizações possam alavancar seu desempenho e atuar preventivamente na correção de desvios que comprometam o resultado de suas operações (CHAKRAVORTY; SHAH, 2012; GARZA-REYES *et al.*, 2016)

4.2 SISTEMATIZAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DA I4

Essa subseção apresenta a sistematização dos princípios e dos elementos da I4 a partir dos artigos selecionados na Etapa 2 deste trabalho de pesquisa. Para a sistematização desses princípios foi realizada uma Análise de Conteúdo nos documentos selecionados com o objetivo de identificar elementos e características da I4 que pudessem ser considerados nessa sistematização.

Conforme apresentado na Seção 3 deste trabalho de pesquisa, também foi considerado na sistematização dos princípios, o modelo conceitual proposto pelo instituto de pesquisa Alemão ACATECH. Esse modelo é utilizado mundialmente para avaliação do grau de maturidade da I4, e pode auxiliar os gestores empresariais no dimensionamento dos impactos da utilização das tecnologias digitais. No seu grau máximo de maturidade a I4 pode beneficiar as empresas contribuindo com a melhoria de sua competitividade, transformando as relações de produção e consumo (BAUER *et al.*, 2015), favorecendo em diversos aspectos o desenvolvimento socioeconômico mundial (BAUER *et al.*, 2015).

Todavia, existem desafios que precisam ser transpostos para que esses benefícios possam ser materializados. Desafios como a integração das redes industriais (ROBLEK *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2017; LU 2017), a implantação de mecanismos digitais de negociação entre dispositivos conectados em rede (WANG *et al.*, 2015), a *cyber* segurança (WANG *et al.*, 2015, LU, 2017), a customização em massa (ZAWADZKI; ŻYWICKI, 2016), os altos custos de implementação e de manutenção das tecnologias, a adequação das estruturas de IcT (LIAO *et al.*, 2017) e a capacitação da força de trabalho (KANG *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a sistematização de princípios pode ajudar as empresas na superação desses desafios e consequentemente auxiliar seus gestores na implantação da I4. Na literatura científica, seis princípios básicos já foram sugeridos por Shafiq (2015). Esses princípios são

interoperability, virtualization, decentralization, real-time capability, service orientation e modularity.

A adoção desses princípios guia as empresas no caminho da implantação da I4 e podem impactar positivamente os processos industriais em questões como redução do tamanho dos lotes de produção, aumento da flexibilidade das operações, redução do *lead time* e redução dos custos operacionais (SHAFIQ *et al.*, 2015), entre outras contribuições. A Figura 8 ilustra os princípios sugeridos pelo autor.

Figura 8 - Princípio da I4 propostos por Shafiq *et al.*, 2015

Princípios		Vantagens
Interoperabilidade		Sistemas trabalhando de forma integrada
Modularidade		Organização, separação, componentização e reusabilidade
Orientação a Serviço		Funções e atividades orientadas a serviços
Virtualização		Otimização do uso de hardwares computacionais
Tempo Real		Processos com interações imediatas
Descentralização		Separar a execução e o processamento em vários hardwares

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

Outra proposta de princípios para a I4 é apresentada por Vogel-Heuser *and* Hess (2016). Os autores sugerem como princípios i) computação em nuvem, ii) integração de dados, iii) flexibilidade, iv) autoorganização, v) interoperabilidade, vi) processo de manufatura, vii) otimização, viii) comunicação segura, e ix) orientação para o serviço. A Figura 9 ilustra os princípios propostos por Vogel-Heuser e Hess (2016).

Figura 9 - Princípio da I4 propostos por Vogel-Heuser e Hess (2016)

Princípios	Vantagens	
Computação em Nuvem	Compartilhamento de recursos	 Redução de Custos
Interoperabilidade	Maior conectividade	
Orientação para o Serviço	Foco no cliente	
Integração de Dados	Menor quantidade de dispositivos de armazenamento	
Otimização	Menor quantidade de recursos	
Processo de Manufatura	Processos estruturados	
Flexibilidade	Maior adaptabilidade	
Autoorganização		
Comunicação Segura	Confiabilidade nos processos	

Fonte: Adaptado de Vogel-Heuser e Hess (2016).

Os termos apresentados nas duas propostas também são referenciados em vários dos artigos mais citados sem que estes sejam relacionados de forma direta a princípios da I4. Nesses trabalhos, os termos são identificados como características ou requisitos para a I4. São exemplos dessa constatação os termos: *interoperability* (WAN *et al.*, 2016; Lu, 2017; ZHONG

et al., 2017), *integration* (CHEN *et al.*, 2017; LIU; XU, 2016; LI, 2018), *flexibility* (LASI *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2016b), *optimization* (POSADA *et al.*, 2015), *decentralization* (VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; LU, 2017; LIAO *et al.*, 2017), *security* (DRATH; HORCH, 2014; WAN *et al.*, 2016) e *self-organization* (WANG *et al.*, 2016a).

Outros termos de igual relevância foram encontrados na literatura científica e também são referenciados como características e/ou requisitos da I4, e poderiam compor o quadro de princípios. São eles: *data interchange* (ROBLEK *et al.*, 2016), *dynamic configuration* ou *dynamic structure* (CHEN *et al.*, 2017), *collaboration* (LIU; XU, 2016; THOBEN *et al.*, 2017), *predictive* (CHEN *et al.*, 2017; THOBEN *et al.*, 2017), *self-configuration* (VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; XU *et al.*, 2018) e *self-optimization* (SANDERS *et al.*, 2016). Esses termos estão compilados na Figura 10.

Figura 10 – Termos potenciais para compor os princípios da I4

Termos	Significado	
Troca de dados	Retroalimentação 	Disponibilização de dados entre processos
Autoorganização		Organização de processos a partir de dados dos processos
Configuração dinâmica		Ajuste de configurações a partir de dados dos processos
Colaboração		Compartilhamento de recursos entre processos
Predição		Prever a ocorrência de desvios nos processos
Autootimização		Otimizar processos a partir de dados

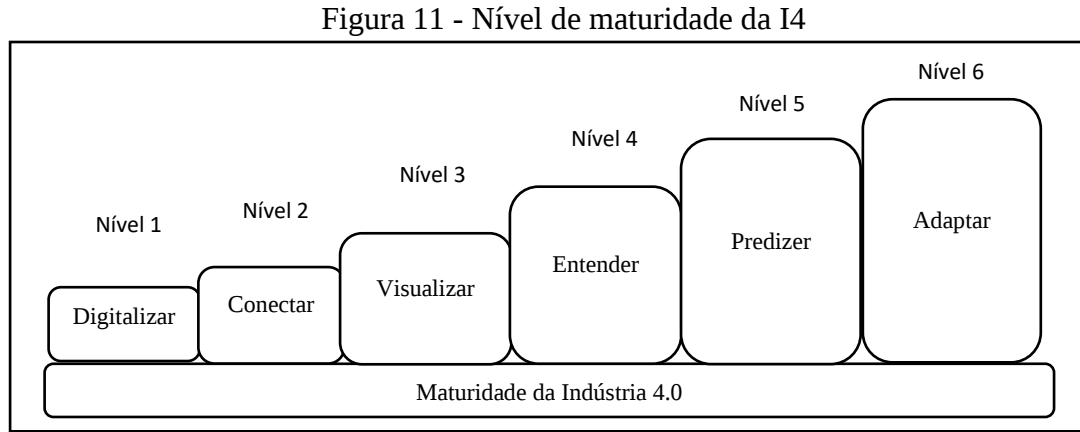
Fonte: Produção do próprio autor.

Ainda no campo dos princípios da I4, Kargermann *et al.* (2013) propõe oito áreas chave, que podem nortear a definição de princípios da I4. São elas: i) *standardization and reference architecture*, ii) *managing complex systems*, iii) *comprehensive broadband infrastructure for industry*, iv) *safety and security*, v) *work organization and design*, vi) *training and continuing professional development*, vii) *regulatory framework* e viii) *resource efficiency*.

Observa-se que essas áreas não são totalmente cobertas pelos princípios propostos por Shafiq *et al.* (2015) e Vogel-Heuser e Hess (2016), e uma combinação entre as visões desses autores, somado a novos termos identificados como características da I4 poderiam integrar a proposição de uma nova lista de princípios.

A utilização de princípios sistematizados pode ajudar as organizações na identificação do seu nível de maturidade em relação à utilização das tecnologias da I4, guiando o processo de implantação. Nesse contexto, destaca-se o modelo proposto pelo centro de pesquisa alemão ACATECH que propõe seis níveis para avaliação da maturidade da I4 (SCHUH *et al.*, 2020).

No modelo proposto pela ACATECH podem ser identificados elementos dos princípios já propostos como por exemplo a digitalização, a conectividade, a predição e a adaptação. A Figura 11 apresenta o modelo proposto.



Fonte: Adaptado de Schuh *et al.*, 2020.

O modelo é fundamental para a compreensão da I4, pois apresenta a trilha esperada para a transformação digital das organizações. Esse modelo enfatiza a importância do processo de digitalização, destacando a evolução esperada nesse processo (SCHUH *et al.*, 2020). O Quadro 10 apresenta a sistematização dos princípios da I4 a partir de um agrupamento que considera o nível de maturidade proposto pela ACATECH, as propostas de Shafiq *et al.* (2015) e Vogel-Heuser e Hess (2016), as áreas chave para sistematização dos princípios proposta por Kagermann *et al.* (2023).

Quadro 10 – Sistematização dos Princípios da I4

#	Princípio	Elementos	Fontes Teóricas
1	Digitalização	Padronização; Virtualização; Descentralização; Flexibilidade; Controle; Otimização	LASI <i>et al.</i> , 2014; LEE <i>et al.</i> , 2015; VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; SANDERS <i>et al.</i> , 2016; ROBLEK <i>et al.</i> , 2016; ZHONG <i>et al.</i> , 2017; THOBEN <i>et al.</i> , 2017
2	Conectividade	Integração; Comunicação Segura; Mobilidade; Colaboração; Gestão de sistemas Complexos	KAGERMANN <i>et al.</i> , 2023; WOLLSCHLAEGER <i>et al.</i> , 2017; CHEN <i>et al.</i> , 2017; LU 2017
3	Dados Compartilhados	Real time capability; Transparência;	WANG <i>et al.</i> , 2016; ROBLEK <i>et al.</i> , 2016; IVANOV <i>et al.</i> , 2016; TAO; ZHANG, 2017
4	Aprendizado	Cognição; Melhoria;	VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; ZHONG <i>et al.</i> , 2017; XU <i>et al.</i> , 2018
5	Capacidade de Predição	Análise de dados e Cenários; Simulação;	WANG <i>et al.</i> , 2016, LU, 2017; ZHONG <i>et al.</i> , 2017
6	Capacidade de Autoajuste	Autoconfiguração Autoorganização Autootimização Autopredição	ZAWADZKI; ŻYWICKI, 2016; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS <i>et al.</i> , 2016; TORTORELLA; ETTERMANN, 2017; THOBEN <i>et al.</i> , 2017

Fonte: Produção do Próprio autor.

A seguir são apresentados e detalhados cada um dos princípios sistematizados a partir da literatura científica.

4.2.1 Digitalização

Os processos devem ser digitalizados e automatizados para ajudar as organizações a diminuir os erros e aumentar a sua produtividade. A digitalização abre espaço para a padronização, para a virtualização, para a descentralização, para a flexibilidade, para o controle e para a otimização dos processos (LASI *et al.*, 2014; LEE *et al.*, 2015).

A padronização contribui com a consistência dos processos, a virtualização permite simular os processos físicos (SANDERS *et al.*, 2016), a descentralização favorece o processo de tomada de decisão (ROBLEK *et al.*, 2016), a flexibilidade viabiliza a customização em massa (ZHONG *et al.*, 2017), o controle ajuda a reduzir desperdícios e a otimização permite que os processos sejam mais eficientes e utilizem apenas os recursos necessários (VOGEL-HEUSER; HESS, 2016).

Para digitalizar seus processos, as organizações precisam utilizar TIC's, sensores de campo e soluções robóticas que viabilizem a automação dos processos. Essas tecnologias devem ser combinadas para eliminar intervenções humanas e aumentar a produtividade (LASI *et al.*, 2014; THOBEN *et al.*, 2017). Soluções mais sofisticadas podem ainda utilizar gêmeos digitais, realidade virtual e aumentada, e inteligência artificial, visando a digitalização dos ambientes de produção e a simulação dos processos (ZHONG *et al.*, 2017; GHOBAKHLOO; FATHI, 2020)

4.2.2 Conectividade

Na I4 é esperado que os diversos sistemas que compõe os processos possam ser integrados por meio de uma comunicação de rede segura, que viabilize a mobilidade e a colaboração entre os diversos dispositivos que compõem esses sistemas (WOLLSCHLAEGGER *et al.*, 2017). Nesse cenário os ambientes das organizações serão cada vez mais digitais, complexos e formados por tecnologias de diferentes fornecedores e padrões de comunicação (CHEN *et al.*, 2017; LU 2017).

Esses ambientes exigirão que as organizações criem soluções e preparem seus gestores para gerir sistemas com alto grau de complexidade, elevados níveis de desempenho e altas taxas de disponibilidade (KAGERMANN *et al.*, 2023). Nestes ambientes estarão conectados robôs,

sistemas computacionais, máquinas com as mais diversas funções e níveis de sensoriamento, impressoras 3D e sistemas físicos cibernéticos (SANDERS *et al.*, 2016).

4.2.3 Dados compartilhados

O compartilhamento de dados é fundamental para o sucesso na implantação da I4. Processos digitalizados precisam disponibilizar seus dados para viabilizar controles automatizados e suportar os processos decisórios das organizações. Esses dados devem ser coletados em tempo real, armazenados em soluções de *Big Data* (WANG *et al.*, 2016) e disponibilizados de forma transparente para que os diversos dispositivos conectados em rede possam receber e processar esses dados (IVANOV *et al.*, 2016; TAO; ZHANG, 2017).

Processos digitalizados são compostos por diversos sistemas e dispositivos conectados em rede. A troca de dados entre eles viabiliza a criação de soluções mais sofisticadas que podem implementar processos decisórios automatizados sem interferência humana (ROBLEK *et al.*, 2016). Estes dados serão compartilhados em sistemas computacionais, dispositivos móveis, interfaces homem máquina e equipamentos dispostos nas mais diversas aplicações (SANDER *et al.*, 2016; LU, 2017; TAO; ZHANG, 2017).

4.2.4 Aprendizado

O compartilhamento de dados somado à utilização de tecnologias como *machine learning* permitem que os sistemas tenham capacidade cognitiva e melhorem continuamente os processos (ZHONG *et al.*, 2017).

Como resultado do processo de aprendizado e da troca de dados entre os diversos dispositivos conectados em rede, espera-se que os sistemas tenham condições de tomar decisões e pavimentar o caminho para a implementação do princípio da autoconfiguração de forma autônoma sem a interferência humana (VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; XU *et al.*, 2018).

Neste cenário os robôs e demais máquinas são dotados de sistemas que acessam bases de dados com tecnologia *bigdata* e executem algoritmos computacionais baseados em inteligência artificial, o que viabiliza a criação de ambientes de aprendizado de máquina e geram oportunidades para a predição e autoajuste de processos (ZHONG *et al.*, 2017; LU *et al.*, 2017).

4.2.5 Capacidade de predição

Dotados de capacidade cognitiva, poder de análise, algoritmos específicos de simulação e acessando bases de dados históricas, os sistemas terão cada vez maior controle sobre os processos e a capacidade de identificar o que irá acontecer no curto e no médio prazo, e assim se antecipar a futuros problemas, o que abre espaço para o último princípio, a capacidade de autoajuste (ZHONG *et al.*, 2017).

Predizer futuras ocorrências é um nível elevado dos sistemas autônomos na I4. A implementação desse princípio ajudará as organizações a reduzir os tempos de parada de máquina, reduzir os problemas de qualidade, melhorar a produtividade e reduzir os custos (WANG *et al.*, 2016, LU, 2017).

4.2.6 Capacidade de autoajuste

A capacidade de autoajuste, último princípio da I4 sistematizado neste trabalho de pesquisa, refere-se ao nível máximo de maturidade de uma organização em relação ao uso de tecnologias digitais. Por meio desse princípio sistemas se autoconfiguram e autoajustam, buscando as melhores configurações para evitar problemas de qualidade e falhas de equipamento. Essa capacidade utiliza dados recebidos de sistemas conectados em rede para decidir quais os melhores ajustes de processo e/ou equipamento (ZAWADZKI; ŻYWICKI, 2016; THOBEN *et al.*, 2017).

No autoajuste não existe nenhuma interferência humana e de fato os sistemas podem ser classificados como soluções autônomas com poder, autonomia e independência (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; TORTORELLA; FETTERMAN, 2017).

4.3 RELAÇÃO TEÓRICA ENTRE LSS E I4

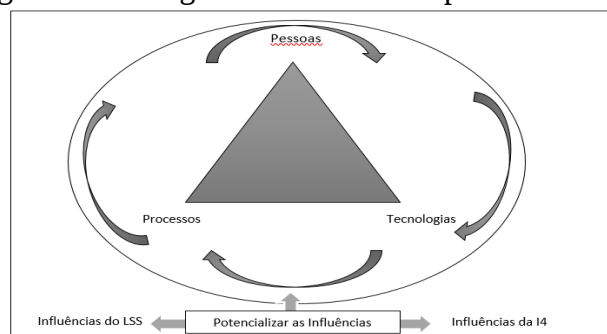
O LSS e a I4 têm propósitos complementares, o que viabiliza sua integração e utilização conjunta por parte das empresas. Entre os benefícios proporcionados por essa integração destaca-se a otimização de processos antes da implantação de tecnologias digitais, o que permite maximizar o retorno sobre os investimentos (BUSCHER; BORGER, 2017; DOMBROWSKI *et al.*, 2017; TORTORELLA; FETTERMAN, 2017). Destaca-se a importância da realização de pesquisas científicas que explorem essa integração para a melhorar a competitividade das empresas.

O número de estudos sobre a integração do LSS à I4 está em ascensão e cada vez mais o tema tem despertado o interesse da academia e do mercado. Precusores do tema, Arcidiacono e Pieroni (2018) iniciaram os estudos sobre a integração do LSS apresentando soluções para uma integração em laboratórios médicos, com destaque para os benefícios e as vantagens dessa integração, já Chiarini e Kumar (2021) também precusores do tema, apresentam os impactos da integração do LSS à I4 em um grupo empresas industriais italianas.

A integração do LSS à I4 pode criar o que Arcidiacono e Pieroni chamaram de metodologia *Lean Six Sigma 4.0* (LSS 4.0). Nessa abordagem os dois temas são combinados para a melhoria da performance das empresas por meio padronização e da digitalização dos processos. Essa combinação não beneficia apenas a indústria, mas pode ajudar também outros setores como, serviços, administração pública e educação, entre outras (ARCIDIACONO; PIERRONI, 2018; CHIARINI; KUMAR, 2021).

As revoluções industriais, incluindo a I4 (4ª revolução), influenciaram a sociedade em três categorias: pessoas, processos e tecnologias. Observa-se que essas categorias também são influenciadas pelo LSS, o que aproxima ainda mais essas duas abordagens. Quando trabalhadas de forma integrada, os temas LSS e I4 podem aumentar de forma positiva a influência sobre essas três categorias, impulsionando os resultados das organizações (ARCIDIACONO; PIERRONI, 2018). A Figura 12 ilustra as três categorias e a influência conjunta do LSS e I4.

Figura 12 - Categorias influenciadas pelo LSS e I4



Fonte: Adaptado de Arcidiacono e Pierroni, 2018.

Artigos sobre LSS são produzidos desde 1990, quando as metodologias *Lean* e *Six Sigma* passaram a ser pesquisadas de forma integrada pela academia. Os artigos que abordam I4 são mais recentes e começaram a ser publicados em 2013. Em relação ao uso combinado do *Lean Manufacturing* com a I4, os primeiros artigos sobre o tema foram publicados em 2016, enquanto os primeiros trabalhos sobre o uso combinado do LSS com a I4 foram publicados em 2018. Esses trabalhos abordando *Lean* ou LSS com I4, foram agrupados em relação às suas

contribuições, sendo identificados 9 grupos distintos a partir do foco e das características desses trabalhos. O Quadro 11 apresenta o resultado desse agrupamento.

Quadro 11 – Contribuições dos trabalhos sobre LSS e I4

Grupos	Contribuições	Autor / Ano
Barreiras	Barreiras na integração do <i>Lean</i> e I4	Sanders <i>et al.</i> , (2016)
Impactos	Efeitos da Digitalização no <i>Lean</i>	Roy <i>et al.</i> , (2015); Rossini <i>et al.</i> , (2019); Ghobakhloo; Fathi (2020); Rosin <i>et al.</i> , (2020)
Benefícios	Benefícios dos <i>Lean</i> para a I4	Dombrowski; Richter (2016); Metternich <i>et al.</i> , (2017)
Semelhanças	Semelhança de propósitos	Kaspar; Schneider (2015); Dombrowski <i>et al.</i> , (2017a); Dombrowski <i>et al.</i> , (2017b); Varela <i>et al.</i> , 2019; Villalba-Diez <i>et al.</i> , (2019)
Modelos	Soluções para integração <i>Lean</i> e I4	Pokorni <i>et al.</i> , (2017); Sony (2018)
Gestão	Impactos na performance das organizações a partir da integração <i>Lean</i> e I4	Tortorella; Fettermann (2017); Tortorella, Giglio; Van Dun (2019); Tortorella, Miorando; Cawley (2019); Kamble <i>et al.</i> , (2020);
Mapeamento de Pesquisas	Caracterização das pesquisas sobre <i>Lean</i> e I4	Buer <i>et al.</i> , (2018)
LSS e I4	Vantagens da integração LSS e I4	Arcidiacono; Pieroni (2018); Chiarini; Kumar (2021)

Fonte: Produção do próprio autor.

O primeiro grupo, definido como Barreiras, representa trabalhos que abordam as dificuldades identificadas no uso combinado do *Lean* e da I4. Sanders (2016) é o único artigo desse grupo. O autor aborda não apenas as barreiras, mas também as formas para superar os desafios da integração do *Lean* à I4.

O segundo grupo, definido como Impactos, aborda os impactos das tecnologias digitais nos princípios *Lean*. Esse grupo é composto pelos artigos de Roy *et al.* (2015), Rossini *et al.* (2019), Ghobakhloo e Fathi (2020) e Rosin *et al.* (2020). Roy *et al.* (2015) apresentam os impactos do *Lean* nas tecnologias I4, Rossini *et al.* (2019) os efeitos positivos da integração em empresas industriais da Europa, Ghobakhloo e Fathi (2020) os efeitos da digitalização em pequenas empresas de manufatura, e Rosin *et al.* (2020) os efeitos na redução de resíduos em processos industriais a partir do uso combinado do *Lean* e da I4.

O terceiro grupo é denominado Benefícios e contém os artigos de Dombrowski e Richter (2016) e Metternich *et al.* (2017). Esses dois trabalhos discorrem sobre as vantagens da integração entre do *Lean* a I4 e sobre a relação existente entre a utilização das tecnologias digitais e a implementação do *Lean*, destacando a importância da eliminação dos desperdícios, antes da aplicação dessas tecnologias.

O quarto grupo, Semelhanças, inclui os artigos de Kaspar e Schneider (2015), Dombrowski *et al.*, (2017a), Dombrowski (2017b), Rossini *et al.* (2019), Varela *et al.* (2019) e Villalba-Diez *et al.* (2019). Esse grupo destaca a convergência de objetivos entre o *Lean* e a I4. Kaspar e Schneider (2015) apresentam um estudo de caso na área da Logística e abordam a convergência entre esses temas, Dombrowski *et al.* (2017a) discutem a relação entre *Lean* e I4 por meio de uma pesquisa com duzentas e sessenta empresas da Alemanha, Enke *et al.* (2017) abordam a potencial da integração do *Lean* à I4 a partir da aplicação de ferramentas de qualidade, Varela *et al.* (2019) apresentam a correlação entre *Lean*, I4 e Sustentabilidade e, por fim, Villalba-Diez *et al.* (2019) estuda a relação entre a resolução de problemas e as tecnologias digitais da I4.

O grupo Modelos, quinto grupo, apresenta os trabalhos de Pokorni *et al.* (2017) e Sony (2018). Pokorni discute uma solução para avaliar a maturidade da integração *Lean* à I4, com foco em empresas do setor industrial a partir de modelos existentes, e Sony (2018) apresenta uma solução para o uso do *Lean* combinado com a I4 no setor da saúde. Gestão, o sexto grupo, representa os trabalhos que abordam os impactos gerados no gerenciamento das organizações industriais a partir da integração do *Lean* à I4. As obras de Tortorella e Fettermann (2018) e Kamble *et al.* (2020) compõem esse grupo. Tortorella e Fettermann (2018) estudam como as melhorias no desempenho organizacional são impactadas pela integração do *Lean* e I4, Kamble *et al.* (2020) estudam os efeitos das tecnologias digitais nas práticas de manufatura enxuta, Tortorella, Giglio e Van Dun (2019) pesquisam os impactos das práticas de produção Enxuta no desempenho operacional, e Tortorella, Miorando e Cawley (2019) discutem o efeito moderador das tecnologias da I4 na relação entre o gerenciamento da cadeia de suprimentos enxuta e a melhoria do desempenho das organizações.

Apenas o artigo de Buer *et al.* (2018) compõe o grupo ‘Mapeamento de Pesquisas’, grupo sete. Nesse trabalho os autores desenvolveram um mapeamento sobre as pesquisas envolvendo a integração do *Lean* à I4. O trabalho identificou cinco linhas de pesquisa e propõe uma agenda para trabalhos futuros. O último grupo denominado ‘LSS e I4’ é composto pelos trabalhos de Arcidiacono e Pieroni (2018), e Chiarini e Kumar (2021). O primeiro aborda a integração do LSS à I4 em um ambiente médico, indicando os benefícios e as vantagens da integração. O segundo apresenta os benefícios da integração do LSS à I4 no ambiente industrial, a partir de um estudo de caso múltiplo em empresas italianas.

Os trabalhos identificados na literatura científica indicam que as tecnologias digitais utilizadas na I4 podem disponibilizar dados com maior confiabilidade e rapidez, contribuindo diretamente com a execução dos projetos de melhoria. Tecnologias como sistemas físico

cibernéticos (BUER *et al.*, 2018), computação em nuvem (DOMBROWSKI *et al.*, 2017a), sensores (SONY *et al.*, 2018), *Big Data* (ARCIDIACONO; PIERONI, 2018), robôs (SANDERS *et al.*, 2016), internet das coisas (GHOBAKHLOO; FATHI, 2020), RFID (KANG *et al.*, 2016) e simulação (SANDERS *et al.*, 2016) podem ser usadas para criar soluções tecnológicas que auxiliem os projetos LSS em atividades-chaves nos projetos de melhoria. Atividades como coleta de dados, compartilhamento de informações (SCHLECHTENDAHL *et al.*, 2014; WAN *et al.*, 2016), controle de processos, redução de desperdícios e redução de variabilidade nos processos (THOBEN *et al.*, 2017), entre outras.

Essas tecnologias também podem ser usadas para implementar controles automatizados, sistemas à prova de falhas, sistemas preditivos e sistemas de simulação (SANDERS *et al.*, 2016), além de auxiliar as equipes de projeto LSS no planejamento e na realização de experimentos e testes. Por outro lado, o LSS pode promover estudos que auxiliem a I4 na definição de configurações otimizadas para melhorar a produtividade das máquinas, na identificação dos melhores *layouts* para instalação de novos equipamentos (KASPAR; SCHNEIDER, 2015; SANDERS 2016; VARELA *et al.*, 2019), no mapeamento de processos para identificação de oportunidades para redução de desperdícios (SANDERS, 2016; POKONI *et al.*, 2017; TORTORELLA; FETTERMANN, 2017), entre outras aplicações.

5 SISTEMATIZAÇÃO DAS SINERGIAS E DISSONÂNCIAS ENTRE LSS E A I4

Sinergias e dissonâncias entre o LSS e a I4 foram sistematizadas neste trabalho a partir da análise cruzada de seus princípios. O cruzamento dos princípios do LSS e da I4 resultou na identificação de vinte sinergias e quatro dissonâncias. O Quadro 12 apresenta as sinergias resultantes e os respectivos impactos para as organizações empresariais.

Quadro 12 – Sinergias entre o LSS e a I4

Princípios da I4	Princípios do LSS	Sinergias Resultantes	Impactos
Digitalização	Foco no Cliente	S1 - Melhoria da Qualidade	Aumento do nível de satisfação dos clientes
	Liderança	S2 - Empoderamento dos Líderes	Melhoria da qualidade do processo decisório
	Força de Trabalho	S3 - Empoderamento da Força de Trabalho	Maior assertividade nas ações
	Projetos	S4 - Gestão Ágil de Processos	Maior agilidade na gestão dos processos
		S5 - Alocação Adequada de Recursos	Maior eficiência no uso dos recursos
	Processos	S6 - Padronização de Tarefas	Diminuição dos erros operacionais
		S7 - Digitalização de Processos	Maior retorno sobre investimentos em tecnologia
	Ferramentas de Melhoria	S8 - Automação de Ferramentas da Qualidade	Aceleração dos projetos de melhorias
Conectividade	Controles	S9 – Automação de Controles	Maior precisão e consistência nos processos
	Projetos	S10 - Integração de Equipes Multidisciplinares	Desenvolvimento técnico da força de trabalho
	Processos	S11 – Conexão de Processos	Maior agilidade e confiabilidade nos processos
Dados Compartilhados	Ferramentas de Melhoria	S12 - Agilidade na Coleta de Dados	Maior assertividade na tomada de decisão
	Controles	S13 – Confiabilidade dos Controles	Maior robustez nos processos
Aprendizado	Foco no Cliente	S14 - Aprendizado	Melhoria contínua dos processos
	Força de Trabalho	S15 - Gestão do Conhecimento	Maior qualificação da força de trabalho
	Processos	S16 - Simulação de Melhorias	Previsibilidade nos processos
Predição	Foco no Cliente	S17 – Antecipação da Identificação de Problemas de Qualidade	Eliminação de retrabalho
	Processos	S18 – Antecipação da Identificação de Falhas de equipamentos	Redução consistente de custos de manutenção
	Projetos	S19 - Aceleração dos Ganhos dos Projetos	Fortalecimento da cultura da melhoria contínua
	Controles	S20 - Ajuste Automático nos Níveis de Controle	Maior precisão e confiabilidade nos processos

Fonte: Produção do próprio autor.

Os impactos apresentados no Quadro 12 indicam que a integração do LSS à I4 influencia e transforma positivamente os ambientes produtivos em questões como cultura organizacional, melhoria de processos e relacionamento com clientes, entre outros aspectos. Para que as empresas possam usufruir dos benefícios decorrentes da integração do LSS à I4 é necessário que seus gestores maximizem as sinergias e mitiguem as dissonâncias existentes entre os temas (Tortorella *et al.*, 2019; Kamble *et al.*, 2020). Sinergia é a cooperação entre forças convergentes e o trabalho conjunto para atingir um determinado objetivo. Ela é o poder combinado de um grupo de elementos que trabalham para maximizar um resultado. Já a dissonância é a falta de harmonia, e em último grau, a discordância no atingimento de um propósito.

Quanto as dissonâncias, como citado anteriormente, elas podem ser em último grau, divergências entre os princípios, o que prejudica a integração do LSS à I4, desmotiva as equipes e impacta negativamente nos projetos de melhoria. As dissonâncias e seus impactos precisam ser conhecidos e mitigados pelas empresas para que a integração do LSS à I4 tenha êxito. O Quadro 13 apresenta as quatro dissonâncias identificadas e seus respectivos impactos.

Quadro 13 – Dissonâncias entre o LSS e a I4

Princípios da I4	Princípios do LSS	Dissonâncias Resultantes (I4 x LSS)		Impactos
		I4	LSS	
Digitalização	Liderança	Gestão de ambientes complexos	Ter ambientes enxutos	Descaracterização do LSS, com os projetos de melhoria deixando de objetivar ambientes enxutos
	Força de Trabalho	Elevados investimentos em capacitação e tecnologia	Melhorar com baixo investimento	Abertura de precedente para que projetos LSS solicitem investimentos antes que todas as possibilidades de melhoria a custo zero sejam exauridas
Conectividade	Processos	Grande diversidade de protocolos	Padronizar processos	Padronização pode deixar de ser uma prioridade para os projetos LSS
	Controles	Elevados custos de manutenção	Reduzir desperdícios	Enfraquecimento da cultura LSS no que tange ao rigor na redução de custos

Fonte: Produção do próprio autor

Destacam-se entre os impactos dessas dissonâncias, a possibilidade de projetos de melhoria deixarem de objetivar ambientes enxutos, a padronização deixar de ser uma prioridade, e por fim, o enfraquecimento da cultura LSS. A compreensão das dissonâncias e de seus impactos é fundamental para o sucesso da integração do LSS à I4. As sinergias e dissonâncias somadas aos estudos de caso, a experiência dos autores, e a contribuição dos especialistas, subsidiaram a proposição do conjunto de *drives* apresentados na Seção 6.

6 ESTUDOS DE CASO

Nesta seção são apresentados e analisados os principais resultados dos quatro estudos de caso realizados neste trabalho de pesquisa, sendo os casos identificados como empresas “A, B, C e D”, a fim de garantir a confidencialidade das empresas estudadas.

6.1 APRESENTAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

Nesta subseção serão apresentadas as principais características e o relatório individual de cada uma das empresas estudadas. O Quadro 14 apresenta a síntese das características dessas empresas, e na sequência, a partir do item 6.1, apresentam-se os relatórios individuais.

Quadro 14 – Caracterização das organizações pesquisadas

Informações	a	b	c	d
Data de Fundação	1865	1863	1901	1949
Data de Fundação no Brasil	1959	1896	1901	1974
Local de Fundação	Alemanha	Alemanha	Brasil	Alemanha
Porte	Grande	Grande	Grande	Grande
Segmento Industrial	Químico	Químico	Siderúrgico	Aeroespacial

Fonte: Produção do próprio autor

6.1.1 Empresa A

A primeira empresa estudada atua no segmento químico, foi fundada na Alemanha, é uma das líderes globais em seu segmento, e tem mais de 150 anos de atuação no mercado mundial. A organização tem seu *head quarter* global baseado em Ludwigshafen na Alemanha, e 390 unidades produtivas instaladas em mais de 80 países.

Com um volume de vendas global de 59 bilhões de euros em 2020, a companhia possui aproximadamente 4200 funcionários atuando no Brasil e 110 mil colaboradores atuando ao redor do mundo nas áreas de administração, de produção e de pesquisa e desenvolvimento. Fundada em 1865 a empresa iniciou suas atividades com a produção de corantes e atualmente, tem seu portfólio de produtos organizado em seis segmentos: Químicos, Materiais, Soluções Industriais, Tecnologias de Superfície, Nutrição e Cuidados, e Soluções Agrícolas.

A empresa possui plantas produtivas na Ásia, na América do Norte, na América Central, na África, no Oriente Médio e na América do Sul. Na América do Sul suas operações estão baseadas na Argentina, na Bolívia, no Chile, na Colúmbia, no Paraguai, no Peru e no Brasil,

onde começou suas atividades produtivas em 1959. No Brasil as unidades produtivas estão presentes nos Estados da Bahia, Pernambuco e São Paulo, onde fica sua sede administrativa e a maior unidade produtiva da empresa na América do Sul. Nessa unidade são produzidos defensores agrícolas, biodiesel e matérias-primas para adesivos, cosméticos, detergentes, tintas e resinas.

Em seu processo de gestão a empresa implementou uma Governança Corporativa baseada na divisão de responsabilidades entre a Diretoria, o Conselho de Administração e o Conselho Fiscal, na participação igualitária de acionistas e colaboradores no Conselho Fiscal, na manutenção e na promoção de seu código de conduta, e na implementação de políticas globais de Segurança, de Saúde e do Meio Ambiente, e Compliance.

Em plataformas de comunicação e documentos internos da empresa, a Diretoria Executiva compartilha sua visão sobre a importância e a relevância das tecnologias digitais para a organização, citando que as mudanças nos mercados e na sociedade são guiadas por questões demográficas e pelo surgimento de novas tecnologias digitais. Cita ainda a Diretoria Executiva, que a empresa reconhece os enormes desafios enfrentados pela sociedade em questões sociais e ambientais, principalmente em função da limitação de recursos naturais e pela crescente demanda dos mercados consumidores, o que tem guiado e pautado as iniciativas da empresa no sentido de buscar alternativas que contribuam de forma positiva com essa agenda.

Em seu Planejamento Estratégico a organização cita sete pilares, que devem guiar e nortear as ações de suas unidades produtivas. São eles: inovação, sustentabilidade, operações, portfólio, pessoas, clientes e digitalização. Cita ainda o Planejamento Estratégico da empresa, que esse último pilar é reconhecido como habilitador de oportunidades, instrumento para geração de valor aos clientes, e instrumento para aumentar a eficiência e a eficácia dos processos.

Conforme citato por membros da Diretoria Executiva, a empresa reconhece a digitalização e o tema I4 como estratégicos para a empresa. Nessa organização a I4 é coordenada por uma área denominada Digitalização de Operações e Tecnologia. Essa área também é conhecida na empresa como *Smart Manufacturing Team* (SM). Ela tem *status* de gerência, é formada por uma equipe de 20 profissionais, e é responsável por todas as iniciativas relacionadas à I4 na América do Sul, existindo gerências similares em outras regiões do mundo. Já o LSS é coordenado por uma gerência denominada *Operational Excellence* (OE), e assim como acontece na SM, a gerência OE também está estruturada por regiões, existindo uma gerência responsável pela América do Sul.

Tanto no caso da SM quanto no caso da OE, os gestores e suas equipes estão baseados no estado de São Paulo, reportando administrativamente para a Diretoria Executiva de Operações da América do Sul.

Em um de seus relatórios mensais, a empresa cita que o uso de tecnologias digitais pode disponibilizar acesso em tempo real a informações relevantes dos processos, além de viabilizar a integração digital de dados internos e externos, fortalecendo a inovação e ajudando seus gestores a prever as demandas de manutenção e qualidade, reduzindo paralizações inesperadas e desvios de qualidade.

O Relatório Anual de Resultados de 2020 cita que a inovação deve ser fortalecida por meio do uso de tecnologias digitais e as atividades de Pesquisa e Desenvolvimento devem avançar com maior velocidade a cada ano, ajudando a empresa e suas unidades produtivas no entendimento e na adaptação de suas ofertas para melhor atender às exigências do mercado. Destaca ainda o relatório, que a empresa colabora com provedores de tecnologia e *startups* para desenvolver soluções digitais inovadoras, o que pode acelerar os processos de inovação, a geração de novas competências e o desenvolvimento tecnológico da organização.

Analizando o plano de investimentos dos últimos cinco anos, identificam-se grandes investimentos voltados para a I4, com valores superiores a quinze milhões de reais no ano de 2020, o que demonstra na prática a prioridade do tema digitalização para essa organização. Para suportar o desenvolvimento de soluções relacionadas à I4 a empresa implantou no Brasil um laboratório denominado MATRIX (*Manufacturing Training and Innovation Experience*). Nesse laboratório as tecnologias da I4 são testadas e integradas, visando o desenvolvimento de soluções tecnológicas que auxiliem a empresa na melhoria contínua de suas operações. Laboratórios como o MATRIX estão disponíveis em outras regiões do mundo como Estados Unidos, Europa e Ásia.

Em relação à aplicação das tecnologias digitais da I4 a gerência de SM tem pesquisado, testado e desenvolvido soluções utilizando *Big Data*, *Biologia Sintética*, *Ciber Segurança*, *Computação na Nuvem*, *Analytics*, *Exoesqueleto*, *Gêmeos Digitais*, *Manufatura Aditiva*, *Internet das Coisas*, *Inteligência Artificial*, *Realidade Aumentada*, *Realidade Virtual*, *Rádio Frequência*, *Robôs*, *Sensores Inteligentes*, *Sistemas Físico Cibernéticos*, *Simulação*, *Rede Sem Fio e 5G*. A maior parte dessas tecnologias são testadas e integradas diretamente no laboratório Matrix da América do Sul, enquanto outras, como por exemplo, *Sistemas Físico Cibernéticos* e *Exoesqueleto* estão sendo testadas em outros laboratórios da empresa ao redor do mundo.

Em relação as iniciativas estratégicas relacionadas a I4, a empresa tem atuado por meio da gerência de SM em várias frentes. São elas:

- Digitalizar processos e contribuir com a melhoria dos controles internos, o que deve flexibilizar as operações, otimizar e padronizar atividades, descentralizar as decisões e descentralizar parte das atividades operacionais;

- Desenvolver iniciativas para garantir a integridade e a segurança da conectividade entre os diversos sistemas que compõem os processos da organização. Essas iniciativas estão ligadas a *cibersegurança*, contingenciamento, proteção das conexões de rede, melhoria da estrutura física das redes de comunicação, monitoramento constante da disponibilidade e do desempenho das redes de comunicação, e a padronização dos protocolos de comunicação;

- Implementar soluções para o compartilhamento de dados coletados em tempo real, compartilhamento de dados na nuvem, compartilhamento de dados entre dispositivos digitais, ampliação do *Big Data* para armazenamento de grandes volumes de dados, utilização de *Analytics* para análise estruturada de dados e extração de informações que suportem os processos, e a automação dos processos de tomada de decisão;

- Pesquisar tecnologias para a implementação de soluções relacionadas ao aprendizado de máquina com foco no autoajuste dos processos, *setup* automático de sistemas e equipamentos, e tomada de decisão autônoma por parte de sistemas e equipamentos;

- Aperfeiçoar as soluções de predição para qualidade e manutenção.

Dentro dessa estratégia as soluções e tecnologias digitais utilizadas pela empresa têm tornado a cadeia de fornecimento mais eficiente, eficaz e integrada. Essa integração envolve fornecedores, clientes e parceiros, e viabiliza a troca de informações em tempo real para aumentar a transparência, a flexibilidade e a agilidade dos processos. Um exemplo são os Tanques Móveis Autônomos (TMA). Estes equipamentos são utilizados para transportar produtos químicos dentro de plantas produtivas na Alemanha, não possuem condutor, são monitorados remotamente a partir de uma sala de controle, são carregadas e descarregadas sem intervenção humana, e trocam informações com sistemas de gestão e planejamento em tempo real. Em breve o TMA também operará em outras plantas na América do Sul, América do Norte e Ásia.

Outro exemplo são as aplicações de virtualização com o uso do software de engenharia COMOS®. Ele é um software desenvolvido e comercializado pela empresa Siemens para gerenciamento integrado de todo ciclo de vida de plantas de processo. O COMOS® promove o monitoramento e o controle de todos os dados de processo, permitindo que engenheiros e operadores acessem informações em tempo real sobre todas as fases de um processo existente ou desenvolvam e simulem um novo processo. O software permite ainda a criação de gêmeos

digitais e espelhamento virtual de processos, o que melhora substancialmente a produtividade, a qualidade e a flexibilidade do trabalho de gestores, engenheiros e operadores das mais diversas áreas, como por exemplo as áreas de processo, operação e manutenção.

Na planta de São Paulo, por exemplo, o software é utilizado para mapeamento e digitalização de processos, o que viabiliza a criação de gêmeos digitais. Estes gêmeos são capazes de reproduzir e replicar o comportamento de processos e equipamentos de forma virtual, permitindo que engenheiros e gestores saibam antecipadamente qual será o resultado de mudanças promovidas em seus processos de fabricação. Nessa unidade produtiva em São Paulo são realizadas cerca de 500 alterações de processo por ano, o que torna extremamente importante a implementação de soluções que suportem o gerenciamento de mudanças.

Até a implantação do COMOS® as informações referentes às alterações de processo não eram registradas, o que inviabilizava a rastreabilidade e a gestão de mudanças. Todavia, a partir da implantação do software, todas as mudanças de processo são previamente testadas, checadas e validadas pela engenharia, o que aumenta a assertividade e minimiza a possibilidade de erros. Todas as informações dos testes e as informações referentes a efetivação das mudanças nos processos físicos são armazenadas em grandes bases de dados, o que permite rastrear, monitorar e controlar os processos com maior acurácia e confiabilidade. No COMOS®, primeiro as alterações são realizadas e validadas nos gêmeos digitais, e só depois das simulações, elas são replicadas em campo.

No campo da robótica a matriz na Alemanha está finalizando a prova de conceito de um conjunto de robôs quadrúpedes que fazem inspeção em áreas de risco. São robôs autônomos com capacidade de andar pelos mais diversos tipos de terreno, coletando e transmitindo informações de forma online. Estas informações são coletadas por meio de sensores e câmeras que viabilizam o monitoramento visual, térmico e acústico. Além disso, estes robôs têm capacidade de análise para detectar anomalias em processos específicos. Por uma questão de confidencialidade, não foi possível saber em quais processos os robôs estão sendo testados, não existindo até o presente momento, nenhuma previsão dos robôs serem utilizados em outras plantas produtivas.

Outra iniciativa igualmente interessante da empresa no campo da I4 é a Integração Horizontal de processos. Equipes da I4, em conjunto com as áreas de Logística e *Supply Chain*, estão trabalhando na integração das cadeias de fornecimento interna e externa (fornecedores de serviços, insumos e matérias-primas). Por meio de plataformas digitais, sensoramento e monitoramento online de itens de estoques, e gestão integrada de áreas de armazenamento, a empresa está criando ambientes de colaboração com seus fornecedores, o que agiliza os

processos de compra, reduz custos e viabiliza a redução dos estoques de insumos e matérias-primas.

Quanto ao atendimento aos clientes, as tecnologias digitais estão permitindo que a empresa ofereça apoio e suporte diferenciados, com a disponibilização de informações precisas sobre a localização de produtos, desde a abertura de ordens de produção, até a expedição e entrega do produto no seu destino. Esse tipo de solução só foi possível a partir da digitalização integral dos processos de planejamento, produção e expedição. Importante destacar que essa rastreabilidade ainda não está disponível para todo o portfólio de produtos, mas apenas para alguns itens.

A empresa também disponibiliza informações em tempo real sobre o desempenho da cadeia produtiva, o que ajuda os gestores na tomada de decisão. Grande parte da cadeia já está digitalizada e integrada. A plataforma digital da empresa mescla os dados globais de transporte com dados relevantes de trânsito e clima, permitindo que as equipes de logística e de atendimento ao cliente trabalhem colaborativamente para melhorar os indicadores *On-Time Delivery* (entrega no prazo) e *On Time In Full* (entrega no prazo e dentro do especificado), entre outros indicadores logísticos.

Ainda no campo das tecnologias, a “Realidade Aumentada” tem ajudado os colaboradores da empresa em várias tarefas diárias, disponibilizando acesso direto e rápido às informações necessárias para a manutenção e para o gerenciamento de equipamentos. *Tablets* e *smartphones* permitem a interação digital do pessoal de manutenção com os cenários nos quais realizam suas atividades, o que favorece o acesso rápido a informações relativas às especificações de equipamentos (manuais técnicos), informações de manutenção e dados relativos ao planejamento das manutenções preventivas e preditivas, além do histórico de reparos. As câmeras dos *Tablets* e *smartphones* são apontadas para pequenas *tags* fixadas nos equipamentos das linhas de produção, o que automaticamente disponibiliza as referidas informações nas telas destes equipamentos.

Utilizando o mesmo recurso, o pessoal da manutenção tem acesso a *checklists* eletrônicos de inspeção, o que viabiliza a consulta e o apontamento online de informações dos processos de inspeção de equipamentos, periféricos e tubulações. Nas manutenções preditivas a empresa utiliza um aplicativo para prever o momento ideal para realizar as manutenções, o que permitiu reduzir em mais de 70% as falhas não planejadas. A solução ajuda a otimizar os processos de manutenção e de produção. Ela é baseada na previsão do estado dos componentes críticos dos equipamentos. Por meio de sensores os dados sobre as condições dos equipamentos são disponibilizados e modelados em tempo real e, em seguida, avaliados por uma função de

análise, que também leva em consideração os dados históricos do equipamento para sinalizar o melhor momento para a realização das atividades de manutenção.

Em relação a integração da I4 com o LSS, foram evidenciadas várias iniciativas de trabalhos conjuntos entre as equipes da I4 e LSS, com destaque para:

- Identificação de oportunidades de melhorias a partir do mapeamento *online* do *status* dos processos;
- Coleta de dados *online* para suportar os projetos de melhoria, o que agiliza o processo de análise e tomada de decisão por parte das equipes de melhoria LSS;
- Comprovação das melhorias de forma rápida e *online* a partir de dados coletados em tempo real, o que permitem comprovar os resultados obtidos a partir das ações propostas nos projetos LSS.

Os gestores responsáveis pelo LSS e I4 foram unânimes em reconhecer que os projetos LSS têm contribuído com a implantação da I4 a partir da identificação e da comprovação estatística de desperdícios, de gargalos e das ineficiências de alguns processos, sinalizando de forma objetiva quais áreas/processos devem ter sua digitalização priorizada, o que corrobora com a Sinergia S7 sistematizada nesse trabalho de pesquisa. Destaca-se que a área responsável pelo LSS incentiva a digitalização apenas dos processos chamados “saúdáveis”. Dessa forma, a área responsável pelo LSS recomenda que projetos de melhoria LSS sejam executados antes da digitalização dos processos. Nesse contexto, todas as áreas da empresa são incentivadas a ajustar seus processos antes de levá-los para o ambiente da I4.

Os gestores responsáveis pela I4 e LSS também reconhecem que as soluções ligadas à I4 têm contribuído com as iniciativas e com os projetos de melhoria da empresa. Essas soluções digitalizam os processos e fornecem dados confiáveis em tempo real para os projetos LSS, reduzindo o tempo de execução dos projetos nas fases de coleta de dados, análise e controle, o que corrobora com as Sinergias S8 (automação de ferramentas da qualidade), S12 (agilidade na coleta de dados) e S19 (aceleração dos ganhos dos projetos).

A I4 tem também contribuído com os projetos de melhoria LSS em questões como padronização de processos, coleta e compartilhamento de dados em tempo real, melhoria da confiabilidade dos dados e redução da variabilidade dos processos. Em uma escala de 1 a 5, o gestor da área de OE aponta como 4 a contribuição da I4 para os projetos de melhoria LSS, corroborando com as Sinergias S8 (automação de ferramentas da qualidade), S12 (agilidade na coleta de dados) e S13 (confiabilidade dos controles).

Na empresa observam-se evidências de que a digitalização gerou melhoras na qualidade, trazendo impactos positivos para os clientes, corroborando com a Sinergia S1

(melhoria da qualidade). Por meio da digitalização de seus processos a empresa tem reduzido os problemas de qualidade e as variações nas propriedades e nas características de seus produtos, aumentando a satisfação de seus clientes.

Conforme já relatado nesse trabalho de pesquisa, constatou-se que a conectividade dos sistemas e processos viabilizou a rastreabilidade de produtos e serviços, o que corrobora com a Sinergia S11 (conexão de processos). Por meio da digitalização a empresa integra os sistemas utilizados nos diversos processos, viabilizando a troca de dados e a rastreabilidade a partir de sistemas, dispositivos móveis e plataformas na *online*. Esse processo de integração é reconhecido na empresa como “verticalização de processos”. Entre os exemplos evidenciados destaca-se o processo de logística reversa. Nesse processo, a empresa e seus clientes, conseguem rastrear seus produtos, da entrega ao consumo, com o posterior agendamento eletrônico do recolhimento de embalagens e liberação automática de um novo pedido de entrega, o que corrobora com as sinergias S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S11 (conexão de processos) e S12 (agilidade na coleta de dados).

A conectividade de sistemas e/ou equipamentos melhorou também a rastreabilidade dos processos de fabricação, corroborando com as sinergias S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S11 (conexão de processos), S12 (agilidade na coleta de dados), S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade), S19 (aceleração dos ganhos dos projetos) e S20 (ajuste automático nos níveis de controle).

Informações geradas pelos diversos processos são transmitidas em milissegundos e são armazenadas em grandes bases de dados, o que permite que quaisquer eventos sejam investigados com precisão e rapidez para a identificação de falhas de equipamento e/ou operação, corroborando com as sinergias S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade), S18 (antecipação da identificação de falhas de equipamentos), S19 (aceleração dos ganhos dos projetos) e S20 (ajuste automático nos níveis de controle).

Evidenciou-se neste trabalho, que a digitalização tem fornecido o ferramental necessário para que a liderança seja empoderada por meio de informações precisas e controles automatizados, o que aumentou a robustez e a agilidade dos processos decisórios no âmbito dos projetos de melhoria LSS, corroborando com as sinergias S2 (empoderamento dos líderes) e S3 (empoderamento da força de trabalho).

Nas observações de campo realizadas na empresa evidenciou-se ainda, que a digitalização viabilizou o monitoramento *online* dos resultados gerados a partir das ações de

melhoria, o que agilizou o processo de tomada de decisão, agilizou a execução de ações corretiva, e melhorou a assertividade dos projetos de melhoria.

A conectividade dos sistemas e equipamentos também elevou o nível de autonomia da liderança e da força de trabalho em suas atividades diárias, corroborando com as Sinergias S2 (empoderamento dos líderes) e S3 (empoderamento da força de trabalho). A conectividade e a verticalização obtidas a partir da digitalização contribuíram com a redução do retrabalho, aumentaram a confiabilidade dos dados e aumentaram a independência das áreas. Com a conectividade as informações são disponibilizadas entre os processos de forma ágil e confiável, permitindo que a liderança e a força de trabalho possam agir e decidir com maior rapidez.

Além disso, a conectividade aumentou a mobilidade, o nível de informações e a prontidão da força de trabalho, o que contribuiu diretamente com o seu desenvolvimento e com os resultados dos projetos de melhoria, corroborando com as sinergias S14 (aprendizado), S15 (gestão do conhecimento), S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade), S18 (antecipação da identificação de falhas de equipamentos), S19 (aceleração dos ganhos dos projetos). Nesse contexto foi evidenciado, que celulares e *tablets* são utilizados com frequência pela força de trabalho para acessar dados dos processos, independentemente de sua localização geográfica, o que permite que os processos sejam monitorados, avaliados e corrigidos de forma digital, sem a presença física dos colaboradores no local onde os eventos ocorrem.

Todo esse processo de digitalização e conectividade favorece a integração de equipes multidisciplinares. Evidenciou-se no estudo de caso, que durante a realização de projetos de melhoria, independentemente de sua localização geográfica, colaboradores de diferentes regiões, áreas e expertises, são envolvidos em reuniões técnicas para discutir oportunidades, ações e desvios em projetos de melhoria. Nesses encontros são utilizadas bases de dados históricas e dados em tempo real, o que enriquece as discussões e favorece a integração, e a troca de experiências entre a força de trabalho, corroborando com as sinergias S2 (empoderamento dos líderes), S3 (empoderamento da força de trabalho), S10 (integração de equipes multidisciplinares), S14 (aprendizado) e S15 (gestão do conhecimento).

No campo da realidade aumentada evidenciou-se que as equipes de manutenção conseguem realizar intervenções em campo, transmitindo imagens em tempo real das atividades que estão sendo executas, para engenheiros localizados fisicamente em outras regiões, o que permite a interação e a troca de informações de forma ágil e precisa.

Para o gestor responsável pelo LSS, a digitalização fornece o ferramental necessário para que a força de trabalho envolvida com o LSS seja empoderada por meio da disponibilização de informações confiáveis, controles robustos, e digitalização de parte de suas

atividades no âmbito dos projetos de melhoria, o que corrobora com várias sinergias sistematizadas neste trabalho de pesquisa. Ainda segundo o gestor da área, a digitalização agiliza a coleta de dados nos projetos, melhora a confiabilidade das informações obtidas, ajuda os funcionários na avaliação dos resultados dos projetos de melhoria, e viabiliza a implementação de controles e sistemas à prova de falha que ajudam a manter os ganhos das ações de melhoria. Esses controles corroboram com as sinergias S4 (gestão ágil de processos), S5 (alocação adequada de recursos), S6 (padronização das tarefas), S7 (digitalização dos processos), S9 (automação dos controles), S12 (agilidade na coleta de dados) e S13 (confiabilidade dos controles).

As observações realizadas em campo neste estudo de caso, ajudaram a evidenciar o monitoramento e o controle *online* de várias variáveis críticas de processo. Em alguns casos foi possível constatar a indicação de tendências, a emissão de alertas, e o autoajuste de processos por meio de malhas de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Essas malhas são algoritmo de controle altamente complexos utilizados na automação industrial para regular variáveis como temperatura, pressão, nível e vazão. Sua função é ajustar de forma automática o valor de variáveis críticas com base no erro entre o valor desejado e o valor real da variável controlada, o que corrobora com a sinergia S20 (ajuste automático dos níveis de controle).

Além disso, esses controles são baseados em dados oriundos de um complexo sistema de sensoriamento digital, o que aumenta a confiabilidade desses controles, corroborando com as Sinergia S9 (automação dos controles) e S13 (Confiabilidade dos controles). Com auxílio da conectividade esses controles são em sua maioria descentralizados, o que viabiliza o acesso *online* de quaisquer locais, por meio de dispositivos móveis e conexões via a rede mundial de computadores.

O pesquisador observou também, que o compartilhamento de dados no ambiente da I4 tem contribuído com o maior engajamento da força de trabalho no âmbito dos projetos de melhoria. Durante a realização das reuniões para a condução dos projetos de melhoria, os funcionários conseguem visualizar em tempo real o que de fato acontece com os processos e com os diversos equipamentos da planta produtiva. Esse compartilhamento favorece também o monitoramento dos processos e a intervenção precisa por parte dos funcionários quando da ocorrência de desvios, em linha com as sinergias S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S11 (

Por meio do compartilhamento de dados em tempo real os operadores avaliam a performance dos processos e dos equipamentos, reagindo de forma rápida e proativa nas correções e ajustes de processo. Além disso, a digitalização permite que os dados históricos

possam ser acessados e centenas de variáveis dos processos sejam cruzadas e analisadas, permitindo que os funcionários possam ter discussões enriquecedoras sobre as possibilidades de melhoria nos projetos LSS, o que vai de encontro as sinergias sistematizadas neste trabalho de pesquisa.

Ficou evidente na atividade de campo, que a digitalização gera soluções que otimizam a utilização de recursos e favorecem a gestão no âmbito dos projetos de melhoria LSS, corroborando com as sinergias S4 (gestão ágil de processos) e S5 (alocação adequada e recursos). Com a automação da coleta de dados, do cruzamento de variáveis e a disponibilização de informações em tempo real, os gestores dos projetos de melhoria podem utilizar melhor os recursos humanos, direcionando esses para atividades mais nobres que envolvam a análise e a tomada de decisão.

A coleta automática de dados contribui também com a maior eficácia na utilização das ferramentas de melhoria LSS, corroborando com a sinergia S8 (automação de ferramentas da qualidade). Nesse contexto, evidenciou-se o uso em tempo real, de dados relativos a variáveis críticas de processo, para realização de regressões e correlações estatísticas, o que permite uma análise ágil e precisa dos problemas de qualidade investigados pelas equipes de melhoria LSS.

Também foram encontradas evidências de que a digitalização contribuiu de forma direta com a padronização dos processos, corroborando com a sinergia S6 (padronização das tarefas). Por meio da digitalização as coletas de dados estão mais confiáveis e ágeis, o que permite que as equipes de melhoria corrijam desvios durante e após a execução dos projetos LSS. Além disso, a coleta automática de KPI's (*Key Process Indicators*) levou a empresa para um novo patamar de gestão e melhoria. Cita o gestor responsável pelo LSS, que a digitalização viabilizou a criação de alertas e, em alguns casos, sistemas à prova de falhas, que ajudam a força de trabalho na realização de suas atividades e reduzem a possibilidade de desvios.

O pesquisador deste trabalho observou em campo, o baixo nível de interferência humana nos processos e o alto grau de digitalização dos processos, o que segundo a força de trabalho entrevistada, culminou com a melhoria dos indicadores de qualidade e performance, o que vai de encontro as sinergias identificadas neste trabalho de pesquisa. Exemplos nesse sentido são a mistura de produtos químicos na fabricação de fertilizantes e tintas. A menor interferência ajudou a padronizar os processos, eliminou problemas de qualidade e reduziu a variabilidade na composição química dos produtos. Além disso, aumentou a velocidade e acuracidade no *setup* dos processos, aumentando a produtividade das linhas de fabricação.

Estudos têm sido promovidos pela empresa para a implementação de soluções voltadas para predição de problemas e implementação de soluções que promovam cada vez mais o

autoajuste de seus processos, o que elevará ainda mais o nível de excelência da empresa. Além disso, a empresa tem investido em soluções que melhorem a experiência de seus clientes. Dois exemplos reais são as soluções OASE CONNECT® e XARVIO®.

A primeira ajuda os clientes de tratamento de gás da empresa na identificação das configurações ideais para seus sistemas por meio do monitoramento em tempo real dos dados dos processos e equipamentos, análise e *feedback* automático para a configuração e ajuste dos sistemas. A segunda é uma plataforma digital que ajuda os produtores no gerenciamento de suas plantações. Por meio dela, os produtores conseguem detectar diretamente no campo, as ervas daninhas, as doenças, os insetos e a condição nutricional do plantio. Ela ajuda ainda no monitoramento de todas as atividades de cultivo no campo.

A empresa desenvolveu também, a partir de uma série de algoritmos, uma plataforma digital denominada LAB ASSISTANT®. Essa plataforma ajuda os clientes na identificação das matérias-primas necessárias e formulações adequadas para a criação de tintas decorativas. Com essa plataforma, os clientes identificam rapidamente as melhores recomendações de formulação para criação seus produtos. Esse tipo de solução utiliza *machine learning* para aprimorar as formulações e melhorar a satisfação do cliente, em linha com a S20 (ajuste automático dos níveis de controle).

Em relação às dissonâncias sistematizadas neste trabalho de pesquisa, os gestores responsáveis pelo LSS e I4 tem uma visão consensual, que a I4 trouxe uma maior complexidade ao processo de gestão, o que é corroborado pelas dissonâncias D1 (gestão de ambientes complexos) e D3 (grande diversidade de protocolos). Para eles, essas dissonâncias são um grande desafio e podem dificultar o processo de integração do LSS a I4, o que segundo eles, pode ser mitigado por meio de um planejamento adequado, estudos detalhados para padronização de protocolos de comunicação, e investimento em plataformas para gestão de ativos. Evidenciou-se nas entrevistas, que a capacitação técnica do pessoal é outro grande desafio para a empresa. Durante os projetos LSS que envolvem o uso e a aplicação de tecnologias digitais, é comum que a empresa invista tempo e recursos financeiros para preparar as equipes, indo contra a proposta de simplicidade, de agilidade e de investimento zero propostos pelos projetos LSS, o que coaduna com a dissonância D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia).

Nesse sentido, o gestor responsável pelo LSS reforçou a importância da digitalização priorizar os processos considerados “saúdáveis”, o que pode tornar a digitalização mais assertiva e agilizar o retorno sobre os investimentos em tecnologia. Ainda segundo esse gestor, é muito comum, que durante os projetos LSS as equipes de melhoria procurem soluções

tecnológicas que as auxiliem na redução dos desperdícios, o que tem elevado os investimentos em tecnologia, indo no sentido contrário da essência do LSS de implementar projetos de melhoria com custo zero, coadunando com as dissonâncias D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia) e D4 (elevados custos de manutenção).

Essas dissonâncias são de fato uma preocupação da área responsável pelo LSS, o que tem exigido um rigor maior na definição dos projetos e nos cálculos que indicam o retorno sobre os investimentos. Segundo o gestor do LSS, é de suma importância que os projetos de melhoria indiquem quais serão os impactos dos investimentos, e se de fato eles trarão o retorno esperado para a empresa. Dessa forma, a decisão sobre o investimento é pautada na comprovação do retorno financeiro e na efetividade da solução. Observa-se ainda, que a implantação da I4 exigirá a implantação de diferentes equipamentos, tecnologias e protocolos de comunicação, o que deve criar ambientes digitais complexos e com altos custos de manutenção, o que também confronta a proposta de simplicidade e soluções enxutas propostas pelo LSS, coadunando com as dissonâncias D1 (gestão de ambientes complexos), D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia), D3 (grande diversidade de protocolos), e D4 (elevados custos de manutenção).

Para os gestor da I4, esse cenário tem exigido que a empresa seja muito rigorosa e crítica na aprovação dos projetos de digitalização, no planejamento, e na gestão dos custos de manutenção, o que tem sido facilitado por meio da pesquisa e desenvolvimento de parceiros em tecnologia, que tenham o expertise necessário para avaliar e validar as tecnologias digitais mais apropriadas para cada necessidade, e tenham disponibilidade para trabalhar de forma colaborativa na criação de soluções que reduzam a necessidade de interfaces e diferentes protocolos de comunicação.

Destaca-se nesse contexto, a importância do laboratório utilizado para testar e homologar as tecnologias utilizadas na I4, o Matrix. Foi evidenciado neste trabalho de pesquisa, que o laboratório está sendo utilizado para simular e homologar a utilização de diversas tecnologias e capacitar a força de trabalho. Essa prática, segundo o gestor responsável pela I4 tem auxiliado a empresa na validação e na estimativa dos retornos sobre o investimento em tecnologia. O laboratório também tem sido um ambiente adequado para que trabalhos colaborativos sejam realizados junto a diversos fornecedores de tecnologia.

6.1.2 Empresa B

A empresa B, assim como a empresa A, também atua no segmento químico, foi fundada, na Alemanha e, é considerada uma das líderes globais no seguimento químico. A organização está presente no mercado desde 1863, quando iniciou suas operações com a produção de corantes. A sede mundial da empresa está localizada na cidade de Leverkusen, região da Renânia do Norte, na Alemanha. Presente em 83 países a empresa emprega aproximadamente 99 mil colaboradores.

A operação global da empresa movimenta anualmente 43 bilhões de euros. As unidades da empresa estão presentes em cinco grandes regiões: Europa, Ásia, África, América do Norte e América Latina. Nesta última a empresa opera no México, El Salvador, Colômbia, Argentina e Brasil. No Brasil a empresa tem unidades produtivas nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, onde também fica a sede brasileira. Presente no Brasil desde 1896, a empresa emprega no país aproximadamente 4.500 pessoas e opera atualmente em três grandes áreas: saúde, agronegócio e materiais inovadores.

A empresa define a inovação e a governança como pilares de seu sistema de gestão. Em relação a inovação a empresa é reconhecida mundialmente como uma das mais importantes indústrias químicas do mundo, apresentando-se como uma organização inovadora de ciências da vida. Com inúmeras inovações lançadas em todos os continentes a empresa tem a ciência como guia principal de suas ações. Reconhecida por suas inovações na área da Saúde, com medicamentos e sistemas de diagnóstico, na área agrícola se diferencia por suas soluções inovadoras e pioneiras em biotecnologias e agricultura digital.

Em relação a governança a empresa adota um rígido sistema de compliance, que permeia todo sistema de gestão e supervisão. A empresa é gerida por um Conselho de Administração e um Conselho de Supervisão Global e seu manual de compliance cita que sua governança é norteadada pela responsabilidade e transparência, com vistas a garantir a expansão e a sustentabilidade dos negócios no longo prazo.

No manual de *compliance*, no código de ética, e em algumas mídias digitais da empresa é possível evidenciar e constatar seu comprometimento com a ciência, inovação, pesquisa e desenvolvimento. Documentos citam o emprego da ciência como um caminho para a melhoria da qualidade de vida da população mundial, com foco no atendimento das necessidades básicas da humanidade, como saúde e alimentação. Citam ainda o esforço da organização para evitar e curar doenças, melhorar as questões de saúde, e contribuir com a alimentação da população mundial.

Em relatórios anuais de 2020 a apresenta cita que suas ações e estratégia estão pautadas na inovação, sustentabilidade e digitalização. Essa última, por sua vez, está alicerçada em três pilares fundamentais: cultura ágil, eficiência operacional e soluções completas de saúde.

Na empresa a I4 é tratada como *Digital Transformation* (DT), termo que também é utilizado para nomear a área que coordena as iniciativas nesta área. Segundo relatórios internos, a empresa tem investido anualmente cifras superiores a vinte milhões de dólares em tecnologia e inovação. A DT, área responsável pela I4, tem *status* de diretoria e está descentralizada por regiões e divisões de negócio (América Latina, América do Norte, Europa, Ásia). A DT tem uma ligação hierárquica com as regiões e divisões de negócio, mas também responde para a sede mundial, reportando suas ações para o *Chief Information Officer* (CIO) global.

Essa estrutura segundo o executivo chefe da DT, tem por objetivo garantir a padronização das iniciativas relacionadas a TIC e I4. No campo da I4, ou transformação digital, como o tema também é tratado internamente, foi possível evidenciar em relatórios, documentos internos e mídias digitais, que o tema ocupa posição de destaque nas prioridades da empresa, com envolvimento direto dos *Chief Executive Offices* (CEO) de cada região. Documentos citam discussões sobre o tema em conferências, *workshops* internos e reuniões anuais de alinhamento e planejamento.

Já o tema LSS está sob responsabilidade de um departamento denominado *Operational Excellence and Logistic* (OEL). Assim como acontece na gerência DT, a OEL também está estruturada por regiões, existindo uma gerência responsável pela América Latina. Essa gerência coordena os projetos de melhoria, a capacitação das equipes e a disseminação da cultura da melhoria contínua. Segundo o gestor da OEL, as unidades produtivas no Brasil, assim como as demais plantas ao redor do mundo, possuem equipes de melhoria formadas por *Black e Green Belts*. Esses profissionais são responsáveis por coordenar e liderar as ações de melhoria contínua com foco na eliminação de desperdícios, redução de variabilidade e aumento da competitividade.

Um relatório trimestral de 2020 apresenta em sua introdução um texto institucional que reforça a importância da transformação digital e da melhoria contínua. Cita o relatório que as ações da empresa devem ser motivadas por alguns objetivos essenciais. Primeiro, pelo objetivo de entregar soluções completas, eficientes e inovadoras, que ajudem a melhorar a qualidade de vida da sociedade, passando por exemplo, por questões como a prevenção, diagnóstico e tratamento de doenças. Segundo, pelo objetivo de tornar a empresa mais ágil, eficiente e *Lean*, contribuindo com a redução de burocracias e repetições, o que impacta diretamente no custo das operações. Por fim, o objetivo de adequar a cultura da empresa as expectativas de seus

funcionários. Neste mesmo relatório a empresa destaca, que cada vez mais as pessoas têm o anseio de trabalhar em empresas desafiadoras e inovadoras, que utilizam a tecnologia como instrumento para melhoria da competitividade, e principalmente, da qualidade de vida de seus funcionários.

A transformação digital é uma ação global da empresa. Ela está baseada em uma mudança de *mindset*, com foco na inovação, na utilização de tecnologias digitais, e principalmente, na busca por soluções que atentam os objetivos estratégicos da companhia. Nas mídias sociais da empresa e em seu portal corporativo existem diversas citações que colocam a transformação digital e a inovação como importantes instrumentos de mudança, que ajudam a empresa a evoluir, fortalecer seu protagonismo, e fomentar a colaboração para desenvolver pessoas e negócios.

Segundo o gestor da diretoria de DT, responsável pela I4, todo esse discurso quanto a digitalização e a inovação já estão gerando frutos, e ao longo dos últimos anos vem se traduzindo em investimentos e apoio da alta administração, o que foi potencializado com a chegada da pandemia. Ainda segundo esse gestor, várias soluções inovadoras que já estavam em processo de desenvolvimento foram aceleradas a partir do avanço da Covid-19. Muitas destas soluções estão sendo desenvolvidas a partir de altos investimentos em pesquisa e desenvolvimento e parcerias estratégicas com *startups*, centros de pesquisa e universidades, além do incentivo interno ao *intraempreendedorismo*.

No campo da medicina por exemplo, a empresa utiliza tecnologias de ponta como inteligência artificial, para decodificar os mecanismos biológicos responsáveis por doenças crônicas, e desenvolver terapias que amenizem ou erradiquem essas doenças. Ainda no campo da saúde, aplicativos foram desenvolvidos para informar e interagir com pacientes por meio de algoritmos de inteligência artificial. Um dos focos da empresa nessa área é compreender e facilitar a jornada de cada paciente, utilizando para isso, ferramentas tecnológicas. Um exemplo nessa área é o aplicativo Universo Médico®, uma solução que oferece todas as informações e conteúdo necessários para ajudar profissionais do campo da saúde em seu trabalho diário. O aplicativo, que em breve deve se tornar uma plataforma de *streaming*, oferece informações sobre produtos da empresa, cursos na área da saúde e conteúdo científico, entre outras informações.

No campo da agricultura a transformação digital também é uma realidade. Segundo informações de profissionais da divisão agrícola, a empresa está empenhada em criar soluções inovadoras que utilizem sensores, softwares, tablets, drones e inteligência artificial, com o

propósito de ajudar os produtores rurais na missão de produzir com maior produtividade e menores custos.

Um dos exemplos de solução para a agricultura é uma plataforma virtual que oferece experiências imersivas, totalmente customizadas a partir das necessidades de cada produtor. Nessa plataforma é possível vivenciar e interagir com um espaço digital, conhecendo produtos e serviços disponíveis no portfólio da empresa. Outro exemplo é o Climate FieldView[®], uma outra plataforma digital que interage de forma personalizada com produtores rurais. Ela coleta e processa automaticamente dados do campo e ajuda o agricultor a avaliar a performance de cada área cultivada, do plantio à colheita. Por meio da plataforma, utilizando inteligência artificial, os clientes podem receber recomendações personalizadas e assertivas sobre os produtos, permitindo que haja ganho de produtividade. Nesta plataforma a empresa oferece o conceito do risco compartilhado, de forma que resultados não favoráveis dão direito a ressarcimento aos produtores na próxima safra.

Relatórios da empresa citam ainda que diversas pesquisas e desenvolvimentos estão em curso nas áreas de Biotecnologia, Química e Agronegócio, o que segundo a empresa mostra seu alinhamento com a inovação e desenvolvimento tecnológico. Além disso, a empresa tem investido em estudos para criação de novos e inéditos modelos de negócio que visam contribuir com o desenvolvimento da sociedade.

Um exemplo é o LifeHub São Paulo, primeiro hub de inovação aberta no Brasil e oitavo no mundo. Esse hub tem o objetivo de desenvolver e acelerar soluções digitais inovadoras para as áreas da saúde e nutrição, atendendo desafios internos e externos.

Quanto à aplicação interna das tecnologias da I4, essa pesquisa evidenciou que a área responsável pela I4 tem desenvolvido soluções focadas em *Big Data*, Computação na Nuvem, *Analytics*, Inteligência Artificial e Sensores Inteligentes. Algumas dessas tecnologias estão sendo testadas e integradas diretamente no laboratório de inovação da empresa situado em São Paulo. Segundo o gestor responsável pela I4, a empresa tem atuado estrategicamente em cinco frentes:

- Digitalizar processos com o objetivo de melhorar os controles internos e padronizar as operações;
- Desenvolver iniciativas para garantir a integridade e a segurança da conectividade com foco em *cibersegurança* e melhoria da estrutura física das redes de comunicação;
- Implementar soluções para melhorar o compartilhamento de dados a partir de soluções voltadas para *Big Data* e *Data Analytics*;

- Pesquisar e implementar soluções voltadas o aprendizado de máquina com o objetivo de autoajustar equipamentos, promover o setup automático de equipamentos, antecipar a identificação de problemas de qualidade, compartilhar informações para tomada de decisão e implementar sistemas de tomada de decisão autônoma;

- Implantar soluções utilizando predição nas áreas de manutenção, visando melhorar a eficiência energética e reduzir o consumo de energia.

A empresa tem investido também na aplicação de tecnologias digitais em suas operações agrícolas. Operações da empresa no campo estão utilizando diversas tecnologias digitais para implementar o conceito de agricultura de precisão. Nesse conceito são integradas diversas tecnologias digitais como GPS (Sistema de Posicionamento Global), IoT e inteligência artificial para que máquinas possam ser operadas remotamente ou de forma autônoma em atividades de plantio, adubagem e colheita. Neste mesmo cenário, soluções envolvendo sensores inteligentes, computação em nuvem e *Bigdata* são utilizados para coletar, transmitir e armazenar informações sobre as condições dos equipamentos, solo, clima e plantio.

A integração de tecnologia e processos é uma das prioridades da empresa segundo o relato de um dos gestores da área responsável pela I4. Ainda segundo esse gestor, a empresa tem atuado fortemente na Integração Horizontal e Vertical de seus processos. A primeira para integrar as unidades e os processos internos por meio de tecnologias digitais, e a segunda para conectar de forma digital as unidades internas, a cadeia de fornecimento e os clientes dos setores agrícola e farmacêutico.

Conforme citado anteriormente, as tecnologias digitais estão permitindo que a empresa ofereça apoio a seus clientes, fornecendo informações proativas sobre produtos e condições de plantio, além de contribuições na área da saúde, como a melhoria da jornada digital dos pacientes.

Quanto a integração do LSS à I4, este trabalho de pesquisa não encontrou evidências concretas de que o LSS esteja contribuindo de forma perceptível com o desenvolvimento e implantação das soluções e projetos ligados a I4. Segundo o gestor responsável pela I4, em uma escala de 1 a 5, o LSS tem contribuído 2 pontos com as iniciativas da I4. Por outro lado, segundo o gestor responsável pela OEL, área que gerencia o LSS, as iniciativas ligadas a I4 tem contribuído de forma efetiva com os projetos LSS, o que na visão dele, pode ser classificado com uma nota 5. Ainda segundo relato desse gestor, a I4 tem contribuído com o LSS nos seguintes aspectos:

- Implementação de controles automatizados, o que tem ajudado na manutenção das ações de melhoria implementadas por meio dos projetos LSS;
- Otimização e automação de processos, o que tem contribuído com a redução de desperdícios e melhorado a utilização dos recursos, potencializando assim, os resultados dos projetos LSS;
- Padronização dos processos por meio de soluções que automatizam as atividades, eliminam os trabalhos manuais e criam uniformidade na realização das tarefas, tornando os projetos LSS mais assertivos;
- Automatização dos processos de coletas de dados, municiando os projetos de melhoria com informações confiáveis e em tempo real, o que agiliza as etapas de coleta de dados e análise, dentro da dinâmica dos projetos de melhoria;
- Previsibilidade dos processos em função da padronização dos processos, o que facilita a tomada de decisão, a previsão de ganhos, e a previsão dos resultados esperados a partir das ações de melhoria.

Assim como o gestor responsável pela I4, o gestor responsável pelo LSS não conseguiu evidenciar que o LSS esteja auxiliando de forma perceptível as iniciativas ligadas a I4. Observa-se nesse contexto, que o LSS na visão destes gestores, não tem contribuído de forma efetiva com a implantação da I4, o que contrária a visão de muitos autores citados neste trabalho de pesquisa. Destaca-se, nesse sentido, que diferentemente da situação observada no estudo de caso da empresa A, os gestores entrevistados na empresa B, ainda não compreendem de que forma o LSS pode agregar valor aos projetos e iniciativas relacionados a I4.

Por outro lado, estes mesmos gestores citaram, que as soluções ligadas à I4 têm contribuído de forma efetiva com as iniciativas e projetos de melhoria LSS, o que nesse sentido, foi evidenciado neste trabalho de pesquisa. Participando de algumas reuniões das equipes de projeto LSS, foi possível constatar, que diversas tecnologias digitais estão disponibilizando dados confiáveis em tempo real para as equipes LSS, o que tem agilizado a execução dos projetos, empoderado a liderança e a força de trabalho, melhorado o conhecimento sobre os processos, gerado *inputs* confiáveis para as ferramentas de melhoria e melhorado os resultados de qualidade, o que coaduna com as sinergias S1 (melhoria da qualidade), S2 (empoderamento dos líderes) , S3 (empoderamento da força de trabalho), S4 (gestão ágil de processos), S8 (automação de ferramentas da qualidade) e S12 (agilidade na coleta de dados).

Nessa mesma linha, o presente trabalho de pesquisa identificou que a digitalização tem auxiliado as áreas produtivas na redução dos desvios de qualidade e variações de processo, o que tem aumentado o nível de satisfação dos clientes, coadunando com a Sinergia S1(melhoria

da qualidade). Soluções com Data Analytics empoderam as equipes de melhoria nas fases de análise, o que tem agilizado a identificação das causas dos problemas de qualidade, e acelerado a execução dos projetos LSS, corroborando também com as sinergias S2 (empoderamento dos líderes), S3 (empoderamento da força de trabalho), S4 (gestão ágil de processos), S8 (automação de ferramentas da qualidade) e S19 (aceleração dos ganhos dos projetos).

Estas soluções com Data Analytics também aumentaram o poder de análise das equipes de melhoria, o que aumentou a sua capacidade de prever problemas de qualidade e falhas de equipamento, coadunando com as sinergias S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade) e S18 (antecipação da identificação de falhas de equipamentos). Conforme observado na área de EHS (Environment, Health and Safety), soluções de Data Analytics também tem contribuído com a previsibilidade de acidentes do trabalho, o que também gera impactos positivos no ambiente de trabalho.

O presente trabalho também evidenciou que soluções HMI (Human Machine Interface) estão integradas a tecnologias digitais como inteligência artificial, sensoriamento inteligente, Iot e Radio Frequência, o que permite a disponibilização de informações precisas dos processos, a implementação de controles automatizados, a integração de processos, a geração de conhecimento sobre os processos, a padronização das operações, e a geração de dados históricos, coadunando com as sinergias S1 (melhoria da qualidade), S4 (gestão ágil de processos), S6 (padronização de tarefas), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S12 (agilidade na coleta de dados), S13 (confiabilidade dos controles), S14 (aprendizado) e S15 (gestão do conhecimento).

Em relação a conectividade dos sistemas e equipamentos, observou-se que a empresa tem soluções que permitem a rastreabilidade de produtos e processos, o que só é possível em função do elevado número de sensores e sistemas interconectados em todas as etapas do processo produtivo, coadunando com a sinergia S11 (conexão de processos). Além disso, estas soluções compartilham informações sobre os processos e produtos por meio de dispositivos móveis e plataformas *Web*, o que também permitiu a liberação de informações sobre produtos e serviços para clientes das áreas médica e agrícola.

Ainda em relação a conectividade de sistemas e equipamentos, evidenciou-se que soluções utilizando *tablets e smartphones* tem aumentado a autonomia da liderança em suas atividades e processos de tomada de decisão, corroborando com as sinergias S2 (empoderamento dos líderes), S3 (empoderamento da força de trabalho) e S4 (gestão ágil de processos). A conectividade de dispositivos móveis com grandes bases de dados que armazenam informações de processos e equipamentos, permite que a liderança acompanhe os

processos em tempo real, o que facilita e agiliza o processo de tomada de decisão, e a rastreabilidade dos processos.

Um exemplo é o controle do gás natural em um forno. Por meio de sensoriamento inteligente, dispositivos móveis e soluções de *Big Data*, a força de trabalho tem acesso a informações como consumo, poder calorífico do gás, condições das misturas ar/gás, condições dos queimadores e condições do sistema de combustão, o que facilita a identificação de problemas, contribui com a identificação de oportunidades de melhoria, municia a manutenção com informações relevantes, e auxilia na previsibilidade de falhas de equipamento, coadunando com as sinergias S2 (empoderamento dos líderes), S3 (empoderamento da força de trabalho), S4 (gestão ágil de processos), S18 (antecipação da identificação de falhas de equipamentos) e S19 (aceleração dos ganhos dos projetos). Ainda neste mesmo exemplo, as informações coletas alimentam uma malha de controle que autoajusta e modula os queimadores, reduzindo o consumo de gás natural, o que coaduna com a sinergia S13 (confiabilidade dos controles) e S20 (ajuste automático nos níveis de controle).

O presente trabalho de pesquisa evidenciou ainda que a liderança tem sido beneficiada por soluções de aprendizado de máquina. Um exemplo é o caso do forno citado anteriormente. Neste exemplo, controles avançados viabilizam o aprendizado de máquina e contribuem com a melhoria do rendimento do equipamento, ajudando os gestores na melhoria dos resultados da área, a partir do aprendizado e autoajuste do processo de combustão, o que tem gerado novos conhecimentos e aprendizados sobre o equipamento, coadunando com as sinergias S14 (aprendizado) e S15 (gestão do conhecimento)..

Evidenciou-se também, que soluções envolvendo *machine learning* resultaram diretamente na melhoria da satisfação de clientes, corroborando com a S1 (melhoria da qualidade), S14 (aprendizado) e S15 (gestão do conhecimento). Um exemplo é a otimização do processo de um dos equipamentos da empresa, um evaporador. Por meio de uma solução de *machine learning* e inteligência artificial o sistema do evaporador consegue aprender as práticas mais adequadas para otimizar o processo de troca de calor e garantir a melhor homogeneidade para cada tipo de produto.

Este trabalho evidenciou ainda a utilização de predição para antecipação de problemas de manutenção, coadunando com a sinergia S18 (antecipação da identificação de falhas de equipamento). A partir de um sistema de monitoramento de vibrações, instalado nos mancais de alguns equipamentos, é possível avaliar a evolução do nível de vibrações e antecipar futuras quebras de mancal, rolamentos, ou desprendimento da base dos equipamentos.

Na empresa foram identificados diversos *dashboards* de indicadores, que acessam grandes bases de dados e disponibilizam dados em tempo real para os projetos de melhoria. Com estes *dashboards* os gestores dos projetos de melhoria e suas equipes, aceleraram o processo de coleta de dados, acompanham o impacto das ações de melhoria, e por fim, implementam controles automatizados, que ajudam na manutenção dos resultados e comprovação dos ganhos, o que corrobora com as sinergias S4 (gestão ágil de processos), S6 (padronização de tarefas), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S12 (agilidade na coleta de dados), S13 (confiabilidade dos controles), S14 (aprendizado) e S15 (gestão do conhecimento).

Por fim, não foi evidenciado em nenhum equipamento ou solução da empresa, que tecnologias digitais da I4 tenham sido utilizadas para simular melhorias, não sendo possível comprovar nesse caso a sinergia S16 (simulação de melhorias).

Quanto às dissonâncias, os gestores responsáveis pelo LSS e I4 citaram que a grande diversidade de tecnologias digitais, protocolos de comunicação e fornecedores, naturalmente tem tornado os ambientes industriais mais complexos e menos *Lean*, o que na visão deles torna a gestão destes ambientes uma missão crítica e delicada, coadunando com as dissonâncias D1 (gestão de ambientes complexos) e D3 (grande diversidade de protocolos). Cita ainda o gestor responsável pela I4, que a implantação das tecnologias digitais tem elevado os custos de manutenção, com a necessidade da aquisição de muitos itens sobressalentes, e a necessidade de contratação mão de obra altamente especializada, o que vai no sentido oposto a proposta de implementação de soluções mais simples propostas pelo LSS, corroborando com as sinergias D1 (gestão de ambientes complexos), D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia), D3 (grande diversidade de protocolos), e D4 (elevados custos de manutenção).

Para eles, essas dissonâncias são uma realidade e um grande desafio na implantação da I4, o que pode dificultar e atrasar o processo de integração do LSS a I4. Assim como no caso da empresa A, os gestores da empresa B citaram o planejamento como um instrumento vital para mitigação dessas dissonâncias. Para eles, as iniciativas de implantação da I4 devem considerar a possibilidade de manter o padrão quanto as tecnologias e protocolos escolhidos em cada projeto, o que pode ser viabilizado por meio de uma avaliação criteriosa sobre as tecnologias e soluções em uso na empresa.

Eles também consideram a capacitação técnica do pessoal envolvido com a I4, como um desafio e um entrave para a integração do LSS à I4, o que coaduna com a dissonância D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia). Para o gestor responsável pela I4, a empresa ainda não possui uma estrutura adequada para atender a todos as demandas dos

projetos de melhoria, o que em muitos casos exige a contratação de terceiros e eleva os custos de implantação da I4. Ele também reconheceu a oportunidade de uma maior integração entre as áreas responsáveis pela I4 e o LSS, o que poderia contribuir com um processo mais eficiente de digitalização, por meio da otimização dos ambientes produtivos antes da implantação das tecnologias digitais, reduzindo custos de implantação e manutenção. Essa visão coaduna com as dissonâncias D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia) e D4 (elevados custos de manutenção).

Destaca-se que a empresa B tem trilhado o caminho da integração do LSS à I4, todavia, os projetos relacionados a I4 ainda não conseguiram usufruir dos benefícios dessa integração, sendo evidenciado, que ainda não existe uma direção clara sobre a necessidade de tornar os processos *Lean*, antes da implementação de novas tecnologias digitais, o que se caracteriza como uma grande oportunidade para maximização do retorno sobre os investimentos em tecnologia.

6.1.3 Empresa C

A terceira empresa estudada atua no segmento siderúrgico e foi fundada no Brasil em 1901. Líder nacional na produção de aço a empresa iniciou seu processo de internacionalização em 1980 com a aquisição de uma siderúrgica no Uruguai. Atualmente, além do Brasil, a empresa possui unidades na Argentina, Canada, Colômbia, Estados Unidos, México, Peru, Uruguai, Venezuela e República Dominicana. No Brasil a empresa tem atualmente 15 unidades instaladas em diversos estados da federação, com seu *head quarter* localizado na cidade de São Paulo.

A empresa é considerada a maior produtora de aço no país, uma das principais fornecedoras de aços longos nas Américas, e um importante player mundial no mercado de aços especiais. No Brasil a empresa produz aços planos e minério de ferro, tendo o título de maior recicladora da América Latina. Empresa de capital aberto, tem ações listadas nas bolsas de valores de São Paulo (B3), Nova Iorque (NYSE) e Madri (Latibex). Anualmente produz cerca de 12,5 milhões de toneladas de aço, atendendo de forma global os mercados do agronegócio, automotivo, construção, energia, máquinas e indústria naval. Com um volume de vendas global de 43 bilhões de reais em 2020, a companhia possui aproximadamente 4500 funcionários.

Em sua Governança a empresa tem como princípios: segurança, clientes, autonomia dos funcionários, ambiente inclusivo, incentivo a liderança, geração de valor, simplicidade e incentivo a aprendizagem. A Governança da empresa tem como estrutura: Diretoria Executiva,

Conselho de Administração e Conselho Fiscal. A diretoria é responsável pela gestão e execução do planejamento estratégico, o Conselho de Administração é responsável pela definição das estratégias de longo prazo e pelo acompanhamento das diretrizes e metas estabelecidas para o negócio. Já o Conselho Fiscal tem a função de monitorar os atos dos administradores e as demonstrações financeiras.

No manual de compliance da empresa e em seu código de ética foi possível verificar seu comprometimento com questões como responsabilidade ambiental, responsabilidade social, compromisso com o clima, ética e compliance. Em relação a responsabilidade ambiental a empresa cita que seu sistema de gestão busca equilibrar os pilares econômico, social e ambiental, e que suas práticas estão alinhadas ao conceito de economia circular. No tocante a responsabilidade social a empresa cita que seu crescimento está diretamente relacionado com o desenvolvimento de seus clientes, fornecedores, colaboradores, comunidades e acionistas. Quanto ao compromisso com o clima, a empresa entende que indústria deve atuar como um dos principais protagonistas no tema. Por essa razão, o tema é um dos elementos trabalhados em sua estratégia de negócio. Por fim, em relação a ética e *compliance* a empresa disponibiliza em suas plataformas digitais, versões eletrônicas de seu código de ética e conduta, código de conduta para terceiros, relatório de indicadores e política de *compliance*.

Analizando a política de compliance, o código de ética e os relatórios trimestrais da empresa, constatou-se que ela tem como pilares de sua estratégia: inovação, sustentabilidade e digitalização. Em um de seus relatórios trimestrais de 2020 a diretoria executiva cita que a digitalização dos processos é uma iniciativa estratégica relevante para fortalecer a competitividade de suas operações e capturar oportunidades. No mesmo relatório a diretoria cita que a pandemia acelerou o processo de virtualização de muitas atividades, gerando maior flexibilidade e agilidade para inúmeras atividades.

Na empresa o tema I4 é referenciado como transformação digital, sendo coordenado por uma área denominada de Tecnologia da Informação e Digital (TI&D). Ela tem *status* de diretoria, tem responsabilidade global sobre todas as iniciativas ligadas a I4, e ajudou a empresa a ser reconhecida como uma das 100 mais inovadoras do país em 2021. A TI&D possui equipes descentralizadas nas diversas unidades de fabricação da empresa e uma ligação funcional com equipes de automação subordinadas hierarquicamente as áreas de engenharia das unidades industriais. Já o tema LSS está sob responsabilidade da área de Excelência Operacional (OE). Também com *status* de diretoria a área é gerenciada a partir do *head quarter* em São Paulo, mantendo equipes específicas locadas nas unidades produtivas em todo país.

Além da responsabilidade pelo LSS a área também é responsável pelo sistema de gestão, auditorias e facilitação do processo de Governança Corporativa, entre outras atividades.

Segundo informações do relatório anual de 2020, a empresa acredita que o processo de transformação digital pode contribuir com a alavancagem dos resultados da companhia. Consta no relatório que 38.100 toneladas de metal foram comercializadas por canais digitais, e 90% dos clientes já utilizam estes canais para compra de metal e/ou relacionamento pré e pós-venda. Também cita o relatório que a empresa conquistou 9.265 novos clientes a partir da utilização dos canais digitais. Na visão da Diretoria Executiva o processo de transformação digital começa com a mudança da cultura organizacional, sendo um pré-requisito, e um dos principais pilares que sustenta o processo. Os outros pilares são: o uso intenso da tecnologia e as novas formas de trabalhos, sem silos, sem hierarquia vertical e com decisões ágeis e autônomas.

Assim como observado na empresa do primeiro estudo de caso, a empresa C também desenvolve parcerias estratégicas com provedores de tecnologia e *startups* para criar soluções inovadoras. A empresa possui um escritório no Vale do Silício para conexão as *startups* americanas e aprovou junto ao Conselho de Administração a criação de um fundo de *Venture Capital* para investir em *startups* no Brasil e nos EUA, com foco em projetos ligados à construção civil e setor automotivo.

Grandes investimentos têm sido aportados para modernização de suas unidades produtivas, com valores direcionados para substituir equipamentos antigos, implantar novas tecnologias e aumentar a capacidade produtiva. Um exemplo é o investimento de R\$ 6 bilhões anunciado para unidades do estado de Minas Gerais. Anunciado em 2021, o investimento será diluído em cinco anos e terá foco em três grandes eixos: crescimento, atualização tecnológica e diversificação.

Segundo o gestor da área de TI&D, o processo de digitalização e a inovação digital já fazem parte do DNA da organização e terão um importante papel no aperfeiçoamento das relações com os clientes. Com a digitalização a empresa poderá ajudar seus clientes a crescer com maior rapidez e eficiência. Ainda segundo o executivo, a digitalização conecta toda a cadeia, de fornecedores a clientes, passando pelos processos comercial, produção e logístico. Tecnologias como IoT, Inteligência Artificial, Big Data e Rádio Frequência são algumas das tecnologias citadas pelo executivo como habilitadoras do processo de transformação digital na empresa.

Entre as iniciativas ligadas ao tema, está a criação da Usina Digital. Neste conceito são utilizadas tecnologias digitais inovadoras para acelerar o processo de digitalização e conectar clientes, cadeia produtiva e parceiros. Um exemplo é a utilização de Drones para mapeamento

de áreas de sucata e execução de inventários a partir de imagens. Com a utilização de Drones e processamento de imagens o inventário de uma de suas unidades caiu de 3 dias para sete minutos.

A empresa também está inovando nos processos de treinamento a partir da utilização da Realidade Virtual. Com esta tecnologia a empresa cria cenários virtuais idênticos aos cenários físicos encontrados nas unidades produtivas, o que permite que os funcionários sejam treinados em ambientes mais seguros e controlados. Nestes cenários é possível criar situações de *stress* e dificuldade muito semelhantes às que serão encontradas no dia a dia, potencializando a experiência e aprendizado dos funcionários. Outro exemplo é o sistema de monitoramento e diagnóstico *online*. Por meio de Inteligência Artificial a empresa consegue atuar de forma preventiva na identificação de falhas de equipamentos. Nesta iniciativa, além da Inteligência Artificial, a empresa utiliza sensores inteligentes que captam as condições dos equipamentos. Já são mais de trinta mil sensores e mais de mil equipamentos conectados a este sistema. De acordo com um dos colaboradores da área de TI&D, esta iniciativa tem contribuído com a redução de custos e aumento da produtividade das unidades produtivas.

Dentre as iniciativas ligadas a digitalização, destaca-se também o controle de processos *online* com a utilização de *smart phones* e *tablets*. Estes equipamentos são utilizados para realização de inspeções e auditorias em tempo real em várias unidades produtivas. Quando o dispositivo móvel é apontado para uma etiqueta com *QR Code* localizada em um determinado equipamento, ocorre instantaneamente a leitura de todas as informações necessárias e um sistema disponível em nuvem apresenta para o funcionário, quais elementos do equipamento devem ser vistoriados no dia. Além disso, uma conexão com um sistema de monitoramento sinaliza se existe algum elemento crítico que necessite de atenção especial.

A gestão de filas *online* é outra iniciativa que a empresa implementou no processo de digitalização. Segundo o gestor da área de TI&D, a iniciativa aumentou em 100% a produtividade dos caminhoneiros, e reduziu em 5% o valor dos fretes. Por meio de um sistema disponível na nuvem, dispositivos móveis, e *tags* instaladas em caminhões que chegam nas unidades produtivas é possível mapear todo o processo de carregamento e descarregamento de caminhões. Esta iniciativa beneficiou a empresa, as transportadoras e os motoristas, que por meio de agendamento prévio passam menos tempo nas filas.

A conexão inteligente de produtos também é uma realidade na empresa, o que facilita a rastreabilidade e os processos de inventário de materiais. Etiquetas com código de barras acompanham os materiais em todos os processos, agilizando a identificação, apontamento e liberação pela área de qualidade. Além das etiquetas são utilizados leitores de código de barra,

sistemas de informação disponíveis em nuvem, e dispositivos móveis para consulta e apontamento de dados. Por fim, os novos laminadores de aço implantados nos últimos anos, são o estado da arte nesta área, e já possuem diversas tecnologias habilitadoras da I4, como inteligência artificial, sensoriamento inteligente, simuladores de processo e sistemas de predição.

A empresa também está testando uma solução para criação de gêmeos digitais. Por meio de uma parceria estratégica com uma grande fornecedora mundial de soluções para automação, a empresa está simulando modificações em alguns produtos, a partir de alterações em ambientes virtualizados. Assim os engenheiros testam e otimizam várias parametrizações de processo de forma segura, sem impactar nos processos físicos ou na qualidade do produto.

Em uma escala de 1 a 5 a área de TI&D classifica como 5 a percepção da empresa quanto a importância da I4 para o futuro da organização. Segundo a área, as iniciativas implementadas e os resultados alcançados corroboram com este sentimento por parte das diversas áreas da empresa. Quanto à aplicação das tecnologias da I4 a área tem pesquisado e implementado soluções ligadas a *Big Data*, Cibersegurança, Computação em Nuvem, *Analytics*, *Internet das Coisas*, Inteligência Artificial, Realidade Virtual, Rádio Frequência, Robôs, Sensores Inteligentes, Simulação e Redes Sem Fio. Estas tecnologias estão sendo pesquisadas e testadas pela área de TI&D por meio de parcerias estratégicas com as áreas de engenharia e automação das unidades produtivas, e com a participação algumas *startups* brasileiras e americanas.

Um dos exemplos bem-sucedidos é uma aplicação para interação com clientes. Por meio de inteligência artificial e *chatbot* (ferramenta digital que interage com o cliente por meio de plataformas de conversação como o *whatsapp*, simulando um diálogo entre humanos) os clientes podem consultar informações sobre os produtos e suas aplicações. Essa solução permite que milhares de clientes possam ser atendidos ao mesmo tempo, o que libera os canais de venda tradicionais para o fechamento efetivo de pedidos. Além disso por meio de soluções em nuvem, as diversas áreas da empresa e os clientes, podem rastrear produtos e *status* de pedidos de forma segura e eficiente.

Em relação à integração da I4 com o LSS, o gestor da área de TI&D destaca que a I4 tem contribuído de forma efetiva com:

- Implementação de controles em tempo real que sinalizam aos projetos de melhoria as condições de equipamentos e processos;
- Coleta de dados *online*, que agilizam o tempo de execução dos projetos, e fornecem informações confiáveis para tomada de decisão;

- Identificação de oportunidades de melhoria a partir do monitoramento *online* dos processos e equipamentos;
- Flexibilização das operações a partir de informações confiáveis que viabilizam a rápida tomada de decisão por parte de gestores e planejadores de produção;
- Simulação e otimização de processos a partir de soluções que utilizam inteligência artificial para indicar as melhores práticas em cada processo;
- Redução da interferência humana e padronização dos processos a partir da automatização de atividades manuais;

Por outra lado, os gestores das áreas de TI&D, responsável pela I4, e OE, responsável pelo LSS, concordam que as iniciativas e projetos de melhoria LSS contribuem com a transformação digital e consequentemente com a implantação da I4. Todavia, não foram encontradas evidências de que projetos de melhoria executados na empresa tenham contribuído de fato com a implantação da I4. Esperava-se identificar a implantação de algumas iniciativas ligadas a I4 que tivessem como base a realização de projetos LSS, sendo estes projetos responsáveis por sinalizar gargalos e ineficiências de processo, e os locais mais adequados para implantação de soluções tecnológicas.

Os gestores também concordam que a I4 tem auxiliado as equipes de melhoria na execução dos projetos LSS. As soluções desenvolvidas a partir da transformação digital aumentaram a confiabilidade e a disponibilidade dos dados dos processos, o que agilizou sobremaneira a execução dos projetos, viabilizou a automação dos controles e facilitou a comprovação das melhorias, corroborando com as sinergias S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S11 (conexão de processos), S12 (agilidade na coleta de dados), S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade) e S19 (aceleração dos ganhos dos projetos).

Além disso, este trabalho de pesquisa evidenciou, que as soluções desenvolvidas a partir do conceito da I4 ajudaram a empresa na padronização dos processos e na redução da variação dos processos, coadunando com as sinergias S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos) e S7 (digitalização de processos). Em uma escala de 1 a 5, o gestor da área de OE considera como 5 a contribuição da I4 para os projetos LSS, corroborando com as evidências observadas em campo.

A implantação da I4 está gerando melhorias significativas em várias áreas da empresa, conforme relatado por colaboradores das áreas responsáveis pela I4 e LSS, como por exemplo a logística, a qualidade e a produção, o que tem melhorado sensivelmente a percepção dos clientes quanto a qualidade dos produtos entregues pela empresa, corroborando com a sinergia

S1 (melhoria da qualidade). O processo de digitalização e a implantação de tecnologias da I4 favoreceu a eliminação de atividades manuais e contribui com a padronização das atividades, o que tem ajudado a empresa a prever com antecedência a ocorrência de desvios na área de qualidade, além de falhas em equipamentos. Analisando os indicadores de qualidade e manutenção foi possível evidenciar uma melhora significativa nos últimos anos, o que segundo colaboradores da área da qualidade e manutenção, só foi possível a partir da implantação de novas tecnologias digitais e execução de diversos projetos de melhoria LSS.

Observou-se ainda, a partir do sistema de planejamento da manutenção, um aumento significativo no número de ações preventivas realizadas pelas equipes de produção e manutenção. Estas ações, em sua maioria foram iniciadas a partir da sinalização de um sistema de predição da qualidade que utiliza inteligência artificial para prever desvios. Esse sistema coleta dados *online*, acessa dados históricos, cruza informações, analisa tendências e faz simulações, sinalizando de forma precisa o que pode ocorrer com os processos nas próximas horas.

Esse cenário extremamente tecnológico e preditivo tem elevado o patamar de excelência da empresa, coadunando com as sinergias S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S11 (conexão de processos), S12 (agilidade na coleta de dados), S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade), S18 (antecipação da identificação de falhas de equipamentos), S19 (aceleração dos ganhos dos projetos) e S20 (ajuste automático nos níveis de controle). Além da inteligência artificial o sistema utiliza o conceito de inteligência de negócios (*Business Intelligence*) para fornecer informações em tempo real sobre o comportamento dos processos, *Big Data* para armazenar as informações e Computação em Nuvem para disponibilizar as informações em qualquer computador conectado à *internet*.

Além disso, para coletar os dados dos processos e construir uma base histórica, este sistema mantém conexões em tempo real com fontes de dados descentralizadas, integradas a diversas máquinas, o que melhorou a rastreabilidade de matérias-primas, produtos semi-acabados e produtos acabados, conectou processos e viabilizou a implementação de controles automatizados, coadunando com as sinergias S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S11 (conexão de processos) e S12 (agilidade na coleta de dados).

A solução também permitiu favorecer a rastreabilidade dos processos, sendo estes visualizados de forma simples e direta de qualquer dispositivo móvel ou estação de trabalho conectada à rede da empresa, o que empoderou sobremaneira a liderança e a força de trabalho

com informações confiáveis e precisas, agilizou os processos decisórios, melhorou a acurácia do planejamento e deu maior assertividade as ações de melhoria, corroborando com as sinergias S2 (empoderamento dos líderes) e S3 (empoderamento da força de trabalho).

Analisando algumas Atas de Reunião de projetos de melhoria executados na empresa, constatou-se que as informações dos processos passaram a ser utilizadas de forma *online*, alimentando de forma rápida ferramentas como Mapa de Fluxo de Valor, Regressões e Correlações estatísticas, o que dinamizou e agilizou os processos de melhoria, e aumentou o conhecimento das equipes de melhoria sobre os processos, corroborando com as sinergias S8 (automação de ferramentas da qualidade), S14 (aprendizado) e S15 (gestão do conhecimento). Para colaboradores da área responsável pelo LSS, o acesso aos dados de processo em tempo real também ajudou a engajar as equipes de melhoria nas fases implementar e controlar. Nestas fases as equipes conseguem visualizar rapidamente os resultados das melhorias implementadas, o que ajuda a manter as equipes focadas no resultado.

Nos projetos de melhoria analisados na empresa, constatou-se que a digitalização contribuiu com a melhoria da gestão destes projetos e ajudou os gestores na otimização dos recursos, corroborando com a sinergias S5 (alocação adequada de recursos). Segundo o gestor da área responsável pelo LSS, ficou evidente que os líderes de projeto conseguiram direcionar os membros de suas equipes para atividades de maior valor agregado, como análises e discussões. Isso só foi possível com a automação de atividades de coleta de dados nas fases medir e controlar, e a implementação controles automatizados.

As conexões entre o sistema e os equipamentos viabilizou ainda o conceito de integração horizontal e vertical da I4, o que viabilizou a consulta em tempo real das ordens de produção por parte das equipes envolvidas nos processos de fabricação, área comercial e clientes, o que também contribuiu com a rastreabilidade de processos e produtos e melhorou o nível de informações das áreas envolvidas.

Soluções como a predição da qualidade e o diagnóstico *on-line* de equipamentos, somados a maior conectividade entre os processos, ajudaram a empoderar a liderança, que passa a ter informações precisas, melhores controles e suporte no processo decisório dentro dos projetos de melhoria, o que também corrobora com as sinergias S2 (empoderamento dos líderes) e S3 (empoderamento da força de trabalho). Segundo colaboradores da área de OE, responsável pelo LSS, a maior conectividade viabilizada pelas tecnologias utilizadas na I4, aumentou a autonomia e independência da liderança, que passou a ser mais assertiva e ágil na identificação de oportunidades de melhoria.

Além disso, segundo esses colaboradores, a maior conectividade e a troca automática de dados entre os equipamentos contribuíram com a redução do retrabalho, aumentaram a confiabilidade das informações e reduziram a interferência manual, o que corrobora com as sinergias S1 (melhoria da qualidade), S4 (gestão ágil de processos), S5 (alocação adequada de recursos) e S6 (padronização de tarefas). Observou-se na empresa C, que a partir de dispositivos móveis os colaboradores, colaboradores das áreas de engenharia, manutenção, processos, qualidade e operação, têm autonomia e liberdade para acessar seus processos, a qualquer horário, independentemente de sua localização, o que facilita o monitoramento dentro dos projetos e rotinas diárias de trabalho.

A mobilidade da força de trabalho também foi impactada pela maior conectividade dos sistemas e equipamentos, ajudando as equipes dos projetos de melhoria LSS no monitoramento, e diagnóstico de problemas e oportunidades de forma remota, a partir de qualquer conexão de rede, ou dispositivo móvel. Esse cenário também habilitou a possibilidade da formação de equipes multidisciplinares geograficamente distantes, que tiveram a oportunidade de acessar e compartilhar dados *online* de seus processos, corroborando com a sinergias S10 (integração de equipes multidisciplinares) e S11 (conexão de processos).

Essas equipes multidisciplinares podem estar fisicamente distantes, inclusive em outras unidades ou países, trocando informações e monitorando os processos e equipamentos em tempo real, por meio de conexões remotas e sistemas de supervisão. Conforme observado em campo, a transformação digital agilizou a coleta de dados e viabilizou a implantação de controles automatizados que ajudam a prevenir falhas, o que potencializou os resultados dos projetos de melhoria S13 (confiabilidade dos controles), S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade) e S18 (antecipação da identificação de falhas de equipamentos).

Um exemplo são as operações dos fornos, que passaram ter suas temperaturas autoajustadas a partir de *feedbacks* automáticos gerados pelo sistema de combustão. O mesmo sistema é capaz de sinalizar falhas no sistema de combustão, gerando alertas e alarmes para a equipe de manutenção.

As possibilidades de implementação de controles automatizados favoreceram os projetos de melhoria nas fases de implementação e controle. Foi evidenciado em campo que alguns projetos LSS tiveram como ação de melhoria a implementação de malhas de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo), viabilizando o autocontrole e o autoajuste de processos, corroborando dessa forma com a sinergia e S20 (ajuste automático nos níveis de controle).

Observações em campo junto a equipes de melhoria, constataram que a força de trabalho recebe alertas periódicos em seus dispositivos móveis, sobre o comportamento de diversos *KPI* (*Key Process Indicator*) críticos, o que permite uma avaliação precisa do comportamento dos processos, sendo possível agir de forma proativa no ajuste e correção de desvios. Esse cenário só foi possível, graças aos sistemas de qualidade preditiva e monitoramento *online* de equipamentos, que além de compartilhar dados, alertam os operadores sobre os desvios em variáveis críticas e armazenam em nuvem, milhares de variáveis críticas por dia, municiando os projetos de melhoria com preciosas informações sobre os processos.

Este trabalho de pesquisa evidenciou junto a área de laminação de aço, que a transformação digital está contribuindo de forma clara com a padronização dos processos, corroborando com a sinergia S6 (padronização de tarefas). Conforme observado em campo, os laminadores recebem automaticamente dados sobre os produtos que serão processados, sendo capazes de selecionar as melhores receitas de produção e otimizar automaticamente suas operações em função do comportamento dos materiais e equipamento. Estes equipamentos são capazes de gerar alertas sobre eventuais desvios, e disponibilizar dados em tempo real para os projetos de melhoria.

O autoajuste destes equipamentos, somado aos sistemas de predição da qualidade e monitoramento *online* de equipamentos, ajudam a evitar problemas de qualidade e falhas de equipamento, corroborando com a sinergias S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos), S1 (melhoria da qualidade), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S11 (conexão de processos), S12 (agilidade na coleta de dados), S13 (confiabilidade dos controles), S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade), S19 (aceleração dos ganhos dos projetos) e S20 (ajuste automático nos níveis de controle).

Nesses laminadores observou-se ainda, que a transformação digital ajudou a reduzir a interferência humana, culminando com a melhoria dos resultados e corroborando com as sinergias sistematizadas neste trabalho de pesquisa. Além da padronização, a redução da interferência humana contribui de forma efetiva com a redução da variabilidade no dimensional das chapas de aço, aumentou a flexibilidade e a agilidade na realização dos *setups*, e viabilizou a redução do tamanho dos lotes de produção, o que aumentou a produtividade destes equipamentos.

Quanto as dissonâncias, gestores e colaboradores das áreas de TI&D e OE, responsáveis pela I4 e LSS respectivamente, foram unânimes em reconhecer e citar, que a transformação digital e a utilização de tecnologias digitais, tornam o processo de gestão muito mais complexo

e desafiador, o que aumentou nos últimos meses a necessidade de prontidão por parte dos colaboradores da área de TI&D, que tiveram suas horas de plantão aumentadas.

Para o gestor da área de TI&D a empresa passa por um processo de aprendizado e ainda é uma incógnita quais são as melhores práticas para superar e sanear este cenário desafiador. Em relação a capacitação técnica do pessoal, outro grande desafio para a empresa, é comum, segundo ele, que os recursos humanos envolvidos nos projetos de melhoria precisem de treinamento em algumas tecnologias empregadas na I4, o que exige grandes aportes financeiros e deslocamento de pessoal das áreas produtivas, contrapondo a proposta de simplicidade e zero investimento propostos pelos projetos LSS, o que coaduna com as dissonâncias D1 (gestão de ambientes complexos), D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia), D3 (grande diversidade de protocolos) e D4 (elevados custos de manutenção).

Em pelo menos dois projetos de melhoria concluídos recentemente, foi constatado que as equipes de melhoria objetivaram a implantação de soluções tecnológicas que contribuíssem com a redução de interferências manuais, o que gerou a necessidade de investimentos em tecnologia, indo no sentido contrário contrapondo a essência do LSS de implementar projetos de melhoria com custo zero, o que coaduna com as dissonâncias D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia) e D4 (elevados custos de manutenção).

Na implantação de algumas soluções utilizadas na I4, como no caso dos laminadores e sistema de monitoramento *online*, diferentes protocolos de comunicação foram instalados, criando ambientes complexos, com altos custos de manutenção, e necessidade de recursos humanos específicos, o que confronta a proposta de implementação de soluções enxutas propostas pelo LSS, corroborando com as dissonâncias D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia) e D3 (grande diversidade de protocolos).

Destaca-se que a empresa tem avançado na integração do LSS com a I4, e que existe uma compreensão clara da importância desta integração por parte das áreas envolvidas. Mesmo com a evidente e expressiva vantagem dos aspectos sinérgicos em relação aos dissonantes, ficou claro que a empresa ainda tem um longo caminho de oportunidades a ser trilhado. Gestores e colaboradores das áreas responsáveis pelo LSS e I4 estão alinhados e tem trabalhado de forma sinérgica na proposição de soluções que alavanquem os projetos de melhoria, melhorem os resultados e, conseqüentemente, melhorem a competitividade da empresa.

6.1.3 Empresa D

A quarta empresa estudada atua no segmento aeroespacial e iniciou suas operações no Brasil em 2005. A empresa faz parte de um grande grupo multinacional que iniciou suas atividades na Alemanha em 1949. O grupo nasceu no período pós-guerra com a proposta de produzir ferramentas e máquinas para a indústria da construção, sendo pioneiro na produção de guindastes de torre, e o primeiro a produzir uma escavadeira hidráulica na Europa. No decorrer dos anos o grupo aumentou seu portfólio de produtos para construção, passou a produzir máquinas para a fabricação e transporte de concreto, começou o desenvolvimento e a produção de refrigeradores, e iniciou as atividades no mercado aeronáutico.

A atuação no mercado aeronáutico teve início em março de 1960, quando o grupo inaugurou a operação de Lindenberg na Alemanha, com o objetivo de desenvolver, fabricar e prestar serviços para sistemas de atuação e controle de voo, trem de pouso, sistemas de gerenciamento aéreo, sistemas eletrônicos de bordo, além de engrenagens e caixas de transmissão. O sucesso do grupo neste mercado permitiu que a operação de Lindenberg se transformasse em uma das mais importantes empresas do grupo, com a expansão das operações para outros países e a atuação também no mercado aeroespacial.

Atualmente a empresa tem operações do mercado aeroespacial em Lindenberg na Alemanha, Toulouse na França, sede atual da empresa, Changsha na China, Novgorod na Rússia, e por fim, no estado de São Paulo, Brasil. A empresa é fornecedora das principais fabricantes de aeronaves e componentes de aviação do mundo, como Boeing, Comac, Dessault, Embraer, Rolls Royce, entre outras. No Brasil a empresa foi a escolhida pela Embraer para desenvolver e fornecer o sistema integrado de gerenciamento de ar e os componentes do trem de pouso da família E-Jets, que inclui as versões E175, E190 e E195, aeronaves comerciais de médio alcance com capacidade para até 132 passageiros.

Para entender a governança da empresa, primeiro é necessário compreender como esse grupo empresarial está estruturado. Ele está organizado de forma descentralizada, dividido em áreas de negócio distintas. A holding baseada em Belle na Suíça, dirige, coordena e monitora todas as operações, o que garante padronização e uniformidade nas atividades das empresas do grupo, e respostas rápidas às solicitações do mercado. Na holding ocorrem periodicamente as reuniões do conselho administrativo, que decide sobre todas as questões fundamentais como as políticas organizacional, financeira e de produtos, bem como novos investimentos e aportes financeiros.

Na holding estão centralizados os departamentos de finanças e contabilidade, auditoria, recursos humanos, comunicação corporativa, infraestrutura e TI, logística, jurídico e segurança, gerenciamento de *compliance* e controladoria.

As áreas de negócio do grupo estão divididas em treze divisões, sendo uma delas a divisão de *Aerospace* e Sistemas de Transporte, divisão esta que engloba a quarta empresa estudada nesta tese. Em sua governança esta empresa tem como elementos norteadores a inovação e o investimento constante em pesquisa e desenvolvimento, sendo estes elementos importantes fundamentais para a visão de longo prazo da corporação, conforme citado na política de governança corporativa da empresa.

Ainda de acordo com a política de governança, estes elementos são fundamentais para o desenvolvimento das tecnologias que serão utilizadas na próxima geração de aeronaves. Cita ainda a política, que o objetivo da empresa é desenvolver tecnologias de ponta que tornarão o transporte aéreo mais ecológico, seguro e confortável. Em 2020 a divisão *Aerospace* e Sistemas de Transporte faturou 1.1 bilhões de dólares, o terceiro maior faturamento entre as treze divisões do grupo, com participação expressiva da operação brasileira.

Em um comunicado institucional divulgado em sua Intranet, a diretoria executiva cita que está atravessando uma jornada digital, sendo os dados um elemento importante para criação de valor, e a base para enfrentar os desafios da digitalização. Em um vídeo institucional, compartilhado nas redes sociais, um executivo da empresa comenta que tecnologias digitais serão utilizadas para melhorar o relacionamento com o mercado e a experiência dos clientes.

Neste vídeo são apresentadas algumas soluções utilizadas pela empresa no processo de digitalização. Soluções como dispositivos móveis para realização de pedidos, realidade virtual para avaliação de requisitos de produtos, simuladores para testar soluções e coletar dados de campo, modelagem 3D para apresentação de componentes, manufatura aditiva para confecção de protótipos, geolocalização de produtos e fornecedores, inspeção utilizando realidade aumentada, monitoramento *online* das linhas de produção, rastreabilidade *online* de produtos semiacabados e acabados dentro das unidades de produção, manutenção preditiva, telemetria e alerta de manutenção *online* para os equipamentos produzidos e comercializados pela empresa, agendamento digital de manutenção e, por fim, inspeção remota de componentes.

O tema I4 na empresa é referenciado como digitalização ou transformação digital, com a coordenação da área de TI para as iniciativas internas e a coordenação da área de P&D nas iniciativas de digitalização envolvendo novos produtos. Em um dos relatórios anuais divulgados pela empresa, a diretoria executiva cita que a digitalização é um dos pontos focais das atividades de P&D, e um norte para o planejamento estratégico.

No caso das iniciativas internas coordenadas por TI, evidenciou-se, que existe uma ligação funcional com a diretoria de TI baseada na Holding do Grupo e uma ligação hierárquica com a diretoria técnica da divisão *Aerospace*. Já o tema LSS está sob responsabilidade da área de Qualidade, área com *status* de gerência que reponde diretamente para a direção de manufatura das plantas produtivas. Além da gestão do LSS a gerência também responde pelo sistema de gestão, auditoria e garantia da qualidade.

Segundo informações do gestor de TI, a empresa tem investido em soluções digitais para otimização da interação entre homem e máquinas, simplificando as operações internas e as operações dos clientes. Ainda segundo esse gestor, a empresa oferece para seus clientes soluções digitais ao longo de toda cadeia de valor, passando pelo planejamento, simulação de operações, análise de dados e ferramentas de diagnóstico e manutenção remota. Entre as iniciativas estratégicas da empresa estão a digitalização, a automação de equipamentos e a segurança. Um importante projeto na transformação digital é o Monitoramento de Condições, o que viabilizou o monitoramento de componentes em máquinas e sistemas complexos comercializados pela empresa.

Em um de seus relatórios financeiros, a empresa cita investimentos de 512 milhões de Euros em pesquisa e desenvolvimento no ano de 2021, com a maior parte desse valor investido no desenvolvimento de novos produtos, e muitos projetos de pesquisa desenvolvidos junto a universidades, e institutos de pesquisa. Ainda segundo informações desse relatório, a grande maioria dos projetos têm foco em tecnologias alternativas e inovadoras.

Quanto a integração do LSS à I4, os gestores das áreas de Qualidade e TI destacaram que a I4 tem agregado valor as iniciativas e projetos LSS, o que, segundo eles, pode ser comprovado pelo elevado grau de automação de seus processos, pela eliminação de erros/falhas gerados por interferências humanas em grande parte dos processos, pela qualidade e abrangência dos dados disponibilizados de forma *online* para as equipes de melhoria LSS e, por fim, pela rapidez com que os projetos LSS são concluídos.

Os gestores dessas áreas também concordam, que os projetos LSS contribuem de forma direta com o processo de transformação digital e a consolidação da I4, o que foi corroborado com uma observação em campo, que evidenciou a contribuição de um projeto de melhoria LSS para a digitalização de um processo comercial. Evidenciou-se, que um novo processo digital de cotação da área de vendas só foi implementado após a realização de um *Kaizen* (atividade LSS) para eliminação dos desperdícios, o que garantiu que a digitalização do processo de cotação fosse otimizado antes de sua digitalização.

Também foram encontradas evidências de que a digitalização ajudou a reduzir a interferência humana nos processos, o que culminou com a redução dos problemas de qualidade, conforme foi constatado em relatórios operacionais dos últimos dois anos. Nesse contexto, esse trabalho de pesquisa evidenciou, que todas as solicitações de matérias primas, equipamentos, ferramentas e insumos, que anteriormente eram realizadas manualmente, passaram a ser realizadas de forma digital com a utilização de coletores de dados e Rádio Frequência.

Além disso, toda programação gerada pelo PCP passou a ser enviada digitalmente para vários equipamentos, resultando na diminuição dos erros de programação e na maior assertividade da equipe do PCP. Esses dados de programação enviados diretamente para os equipamentos viabilizaram o carregamento automático das receitas e a criação de controles automatizados, o que reduziu para zero as falhas de *setup* e as falhas operacionais. Além disso as informações enviadas passaram a ser cruzadas com os dados gerados no processo, viabilizando a geração automática de relatórios e análises estatísticas sobre a relação entre os parâmetros das receitas e o resultado dos processos.

Nesse contexto, as equipes de melhoria LSS foram extremamente beneficiadas, pois passaram a contar com informações *online* de todas as etapas do processo, viabilizando a realização de estudos precisos para determinar as oportunidades de melhoria e mais adequadas para cada processo. Esse cenário extremamente tecnológico e conectado coaduna com as sinergias S1 (melhoria da qualidade), S2 (empoderamento da liderança), S3 (empoderamento da força de trabalho), S4 (gestão ágil dos processos), S5 (alocação adequada de recursos), S7 (digitalização de processos), S9 (automação de controles), S11 (conexão de processos), S12 (agilidade na coleta de dados), S13 (confiabilidade dos controles), S17 (antecipação da identificação de problemas de qualidade), S19 (aceleração dos ganhos dos projetos) e S20 (ajuste automático nos níveis de controle). Por uma questão de confidencialidade não foi possível citar exemplos de equipamentos e processos beneficiados por essa iniciativa.

Segundo os gestores das áreas responsáveis pelo LSS e I4, a utilização de tecnologias digitais da I4 contribuíram em vários aspectos com os projetos de melhoria LSS, o que segundo eles, resultou em uma maior eficácia e eficiência dos desses projetos. Para o gestor responsável pelo LSS, as iniciativas ligadas a I4 municiam a empresa e consequentemente os projetos de melhoria com tecnologias que tornam os projetos mais ágeis e assertivos. Em uma escala de 1 a 5 esse gestor classifica como 4 a contribuição da I4 para os projetos de melhoria LSS.

Em campo, este trabalho de pesquisa evidenciou, que os equipamentos que ainda não recebem os parâmetros de *setup* automaticamente, estão sendo parametrizados por meio de

leitores de QRCode, o que também tem ajudado a empresa na redução dos erros de *setup*. Esse trabalho também evidenciou que toda sistemática de certificação de peças que anteriormente era realizada de forma manual e em papel, foi digitalizada, garantindo assim, a rastreabilidade total dos processos. Desta forma, os clientes e colaboradores autorizados podem acessar de qualquer dispositivo conectado à rede mundial de computadores as informações referentes a certificação de produtos, corroborando com as sinergias S1 (melhoria da qualidade), S4 (gestão ágil dos processos) e S7 (digitalização dos processos).

Em relação as vendas, observou-se que todos os clientes já conseguem acompanhar os dados de seus pedidos em tempo real, o que permite o rastreamento dos produtos em quaisquer etapas do processo de fabricação. Evidenciou-se ainda, junto a equipe responsável pela I4, que as conexões digitais entre o sistema e os equipamentos estão viabilizando de fato os conceitos de integração horizontal e vertical, o que na prática conecta os processos internos e externos e favorece a rastreabilidade total de matérias-primas, insumos, produtos e processos, corroborando com as sinergias S7 (digitalização de processos) e S11 (conexão de processos).

Segundo colaboradores da Qualidade, área responsável pelo LSS, a digitalização tem fornecido o ferramental necessário para que a liderança e a força de trabalho sejam empoderados por meio da disponibilização de informações em tempo real, melhores controles e automação de parte de suas atividades no âmbito dos projetos de melhoria. Ainda segundo esses colaboradores, a conectividade dos equipamentos com sistemas de gerenciamento da manufatura aumentaram substancialmente a autonomia da liderança em suas atividades e processos de tomada de decisão, o que foi evidenciado por meio do sistema MES (*Manufacturing Execution System*), disponível em todo chão de fábrica e disponível externamente no ambiente *cloud computing*.

Esse sistema conecta e monitora os equipamentos do processo produtivo e as áreas de planejamento, produção, qualidade e manutenção. Sua função é organizar, controlar e monitorar as atividades produtivas, objetivando aumentar a eficiência e reduzir os custos. O sistema é uma ferramenta importante para a gestão e para os projetos de melhoria, pois fornece informações confiáveis, ajuda na implementação de controles e suporta os processos decisórios da liderança, o que vai de encontro as sinergias sistematizadas e apresentadas nesse trabalho de pesquisa.

Em relação a mobilidade da força de trabalho, essa pesquisa evidenciou, que toda força de trabalho pode acessar o sistema MES por meio da *Intranet* da empresa, estações de trabalho conectadas a rede mundial de computadores, ou dispositivos móveis utilizando redes 4G, o que contribui com o monitoramento efetivo de todos os processos. Essa pesquisa também constatou que os dados capturados por meio do sistema MES são disponibilizados com frequência para

utilização em ferramentas de qualidade e ferramentas estatísticas, corroborando com as sinergias S8 (automação de ferramentas da qualidade).

Assim como nos estudos de caso das empresas A, B, C, na empresa D a maior conectividade dos processos, sistemas e equipamentos favoreceu o trabalho das equipes multidisciplinares de melhoria. Conforme relatado por integrantes da área da Qualidade, responsável pelo LSS, é comum que projetos de melhoria tenham equipe formadas por colaboradores de várias áreas, plantas e países distintos, que conseguem interagir e acompanhar os processos de forma remota com o suporte de tecnologias com *cloud computing*, realidade aumentada, e interfaces homem máquina.

Nesse contexto, os colaboradores podem estar conectados remotamente como se estivessem no mesmo espaço físico, trocando informações e monitorando os processos e equipamentos em tempo real, o que corrobora com a sinergia S10 (integração de equipes multidisciplinares). Observa-se neste contexto, que não existem mais barreiras físicas para a formação das equipes de trabalho e compartilhamento *online* de dados.

Esta pesquisa evidenciou ainda, que vários equipamentos são dotados com sistemas de controle que avaliam os comportamentos de variáveis de processo e sinalizam a operação quando estas apresentam valores fora do especificado, o que, segundo o gestor da área da Qualidade, tem melhorado a capacidade dos processos e reduzido o DPMO (Defeitos por milhão de oportunidades). Estes controles corroboram com as sinergias S9 (automação de controles) e S13 (confiabilidade dos controles). Esta pesquisa também evidenciou, que vários controles implementados nos processos produtivos, haviam sido definidos e implementados por meio de projetos de melhoria LSS. Destaca-se, que esses controles tinham como base um conjunto de sensores inteligentes, o que viabilizada o *feedback* e o ajuste automático de processos, corroborando com a sinergia S20 (ajuste automático nos níveis de controle).

O presente trabalho também encontrou evidências de que a transformação digital está contribuindo com a padronização dos processos, corroborando com a Sinergia S6 (padronização de tarefas). Um exemplo nesse sentido são os *setups* de equipamentos citados anteriormente nessa seção. Por meio da automação do processo de *setup* foi possível padronizar a parametrização de parte dos equipamentos e processos. Esta ação agilizou o processo de *setup*, aumentou a produtividade e reduziu problemas de qualidade decorrentes de erros de parametrização.

Em relação as dissonâncias, houve consenso entre os gestores das áreas de Qualidade e TI, quanto ao aumento da complexidade do processo de gestão em função da adoção de tecnologias digitais. Para eles a grande variedade de fornecedores e tipos de tecnologia dificulta

não apenas o processo de gestão no chão de fábrica, mas também a escolha da tecnologia mais adequadas para cada necessidade, o que corrobora com a sinergia D1 (gestão de ambientes complexos).

Para o gestor de TI, as tecnologias digitais inseriram problemas adicionais ao processo de gestão. Segundo ele, a necessidade de manter as soluções disponíveis vinte e quatro horas por dia tem levado sua equipe a investir em itens de reposição e redundância de sistemas, sensores e equipamentos, o que vai de encontro com as dissonâncias D1 (gestão de ambientes complexos), D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia), D3 (grande diversidade de protocolos), e D4 (elevados custos de manutenção). Ainda segundo esse gestor, as tecnologias da I4 exigem um elevado conhecimento técnico, o que elevou nos últimos meses os gastos com capacitação nessa área, indo de encontro a dissonância D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia).

O gestor da área responsável pelo LSS apresentou três exemplos de projetos, onde as equipes envolvidas propuseram investimentos significativos em tecnologia digital para redução de interferências humanas e consequente resolução de problemas, indo no sentido contrário do LSS de implementar projetos de melhoria com custo zero, corroborando com a dissonância D2 (elevados investimentos em capacitação e tecnologia). Na implantação de soluções utilizadas na I4, como no exemplo do *setup* de equipamentos, diferentes protocolos de comunicação foram utilizados, criando soluções complexas com a necessidade de pessoal com formação específica para manutenção, o que confronta a proposta de implementação de soluções enxutas propostas pelo LSS, indo de encontro com a dissonância D4 (elevados custos de manutenção).

De fato, ao analisar a equipe de manutenção da empresa, observou-se uma grande diferença, quando comparada com as tradicionais equipes de manutenção do passado, majoritariamente formada por mecânicos e eletricitas. Na empresa D evidenciou-se a presença de instrumentistas e engenheiros de automação, o que corrobora com a visão de muitos autores da literatura científica, sobre a necessidade cada vez maior de equipes com um alto grau de especialização para implantação e manutenção da I4.

Destaca-se, por fim, que a empresa ainda está no início do processo de integração do LSS à I4, com muitas oportunidades a serem exploradas. Conforme citado pelo gestor responsável pelo LSS, existe um senso comum na organização quanto a importância do processo de integração, porém, ainda pairam muitas dúvidas e incertezas sobre esse processo. Ele acredita que nos próximos anos os custos de implementação da I4 cairão drasticamente, o que tornará cada vez mais comum a sua aplicação e a integração com o LSS.

6.2 ANÁLISE CRUZADA DOS ESTUDOS DE CASO

Nesta subseção é apresentada a análise cruzada dos estudos de caso realizados em quatro empresas do setor industrial. O objetivo é evidenciar e comparar as características das empresas participantes e relacioná-las às sinergias e dissonâncias, além de apresentar as boas práticas e as principais dificuldades identificadas para integração do LSS à I4.

6.2.1 Sinergias e dissonâncias nos Estudos de Caso

As sinergias e dissonâncias entre o LSS e a I4 foram evidenciadas nas quatro empresas estudadas por meio de entrevistas, análise de documentos e observações *in loco*, o que aumentou a compreensão do pesquisador deste trabalho sobre o potencial da integração do LSS à I4, e contribuiu com a proposição dos *drives* apresentados na Seção 7. No Quadro 15 são apresentadas as sinergias observadas em cada uma das empresas estudadas.

Quadro 15 – Sinergias entre o LSS e a I4 nos estudos de caso

Princípios I4	Princípios LSS	Sinergias Resultantes	Empresas			
			A	B	C	D
Digitalização	Foco no Cliente	S1 - Melhoria da Qualidade	☑	☑	☑	☑
	Liderança	S2 - Empoderamento dos Líderes	☑	☑	☑	☑
	Força de Trabalho	S3 - Empoderamento da Força de Trabalho	☑	☑	☑	☑
	Projetos	S4 - Gestão Ágil de Processos	☑	☑	☑	☑
		S5 - Alocação Adequada de Recursos	☑	☐	☑	☑
	Processos	S6 - Padronização de Tarefas	☑	☑	☑	☑
		S7 - Digitalização de Processos	☑	☑	☑	☑
	Ferramentas de Melhoria	S8 - Automação de Ferramentas da Qualidade	☑	☑	☑	☑
	Controles	S9 – Automação de Controles	☑	☑	☑	☑
Conectividade	Projetos	S10 - Integração de Equipes Multidisciplinares	☑	☑	☑	☑
	Processos	S11 – Conexão de Processos	☑	☑	☑	☑
	Ferramentas de Melhoria	S12 - Agilidade na Coleta de Dados	☑	☑	☑	☑
Dados Compartilhados	Controles	S13 – Confiabilidade dos Controles	☑	☑	☑	☑
Aprendizado	Foco no Cliente	S14 - Aprendizado	☑	☑	☑	☐
	Força de Trabalho	S15 - Gestão do Conhecimento	☑	☑	☑	☐
	Processos	S16 - Simulação de Melhorias	☐	☑	☐	☐
Predição	Foco no Cliente	S17 - Antecipação da Identificação de Problemas de Qualidade	☑	☑	☑	☑
	Processos	S18 - Antecipação da Identificação de Falhas de Equipamentos	☑	☑	☑	☐
Autoajuste	Projetos	S19 - Aceleração dos Ganhos dos Projetos	☑	☑	☑	☑
	Controles	S20 - Ajuste Automático nos Níveis de Controle	☑	☑	☑	☑

Fonte: Produção do próprio autor

Melhoria da qualidade, sinergia S1, foi identificada nas quatro empresas estudadas. Estas empresas conseguiram elevar o nível de satisfação de seus clientes por meio da

implementação de soluções digitais que utilizam sensoriamento inteligente, IoT, RDIF e Big Data. Estas soluções automatizaram os processos, e melhoraram os controles internos, o que contribuiu com a redução significativa de defeitos, coadunando com a visão de Dalenogare *et al.* (2018).

A sinergia S2, Empoderamento de Líderes, foi identificada nas quatro empresas. Nelas foram implantadas soluções digitais utilizando dispositivos móveis, IoT, RFID e sensoriamento remoto. Estas soluções permitem que os líderes dessas empresas acessem dados confiáveis em tempo real, tenham maior visibilidade sobre o andamento dos processos, e maior controle sobre a utilização de recursos, o que os ajuda a tomar decisões mais assertivas, com menores riscos e maior velocidade, tornando-os mais seguros e empoderados, coadunando com a visão de Varela *et al.* (2019).

A sinergia S3, Empoderamento da Força de Trabalho, também foi identificada nas quatro organizações estudadas. Por meio de tecnologias como tablets, leitores ópticos, sensoriamento inteligente, sistemas de supervisão e bases de dados descentralizadas, a força de trabalho das empresas estudadas acessa informações dos processos em tempo real, monitora, controla e interage com os processos de forma remota, e troca informações e experiências com equipes multidisciplinares fisicamente distantes, o que favorece a autonomia e o desenvolvimento técnico da força de trabalho, indo de encontro com a percepção de Kowang *et al.* (2016).

A sinergia S4, Gestão Ágil de Processos, foi identificada nos quatro casos. Tecnologias digitais como sensoriamento inteligente, analytics, dispositivos móveis, inteligência artificial e bases de dados descentralizadas estão auxiliando os gestores dessas empresas no acompanhamento dos processos, na gestão de recursos e na tomada de decisão, o que torna mais dinâmicos, transparentes e objetivos os processos de gestão, coadunando com a visão de Sanders *et al.* (2016).

A sinergia S5, Alocação Adequada de Recursos, foi identificada nas empresas A, C e D. Nelas as tecnologias digitais permitem que os gestores acompanhem em tempo real a evolução dos projetos de melhoria, e monitorem de forma interativa a alocação de recursos financeiros, humanos e materiais, o que favorece a gestão e o uso eficiente destes recursos, e corrobora com a visão de Buscher e Borger (2017).

A sinergia S6, Padronização de Tarefas, foi identificada nas quatro organizações. Nestas empresas a utilização de tecnologias como robôs, sensores inteligentes e IoT, favoreceu a eliminação de trabalhos manuais e a padronização de atividades, o que contribuiu com a

diminuição de erros operacionais, aumentou a produtividade e impactou positivamente nos custos operacionais, indo de encontro com a visão de Kaspar e Schneider (2015).

A sinergia S7, Digitalização de Processos, foi identificada nas quatro empresas estudadas. Estas empresas trabalham antecipadamente na eliminação de desperdícios, evitando que estes desperdícios sejam potencializados por meio da implantação sem critérios de tecnologias digitais, o que torna mais eficiente a digitalização dos processos e acelera o retorno sobre os investimentos, coadunando com a visão de Tortorella e Fettermann (2018).

A sinergia S8, Automação de Ferramentas de Qualidade, foi identificada nas quatro empresas. Nestas empresas tecnologias como sensores inteligentes, big data, analytics e inteligência artificial estão alimentando os projetos LSS com dados confiáveis, facilitando a aplicação de ferramentas de melhoria como Kaizen, Mapas de Fluxo de Valor, e Desdobramento da Função Qualidade, o que agiliza a execução e potencializa os resultados dos projetos de melhoria, corroborando com a visão de Chiarini e Kumar (2021).

A sinergia S9, Automação de Controles, foi identificada nas quatro organizações. Em todas as empresas estudadas foram evidenciadas soluções utilizando sensoriamento remoto, IoT e inteligência artificial, com o objetivo de aumentar o nível de monitoramento dos processos, melhorar o controle de variáveis críticas, e viabilizar a correção automática de parâmetros de processo, o que culminou com a melhoria de resultados operacionais e aumentou a lucratividade dessas empresas, indo de encontro com a visão de Thoben *et al.* (2017).

A sinergia S10, Integração de Equipes Multidisciplinares, foi evidenciada nas quatro empresas. Tecnologias digitais como realidade virtual, ferramentas de simulação e gêmeos digitais, somadas as tradicionais ferramentas de vídeo conferência, são utilizadas nessas empresas para testar processos, analisar cenários e aproximar profissionais distantes geograficamente dos processos produtivos, o que agilizou a resolução de problemas e permitiu antecipar os impactos das mudanças de processo, coadunando com a visão de Wang *et al.* (2016).

A sinergia S11, Conexão de Processos, foi identificada nas quatro empresas estudadas. Nelas foi evidenciado que processos são rastreados e monitorados em tempo real por meio de soluções que utilizam tecnologias como sensoriamento remoto, rádio frequência, big data e analytics. A rastreabilidade de processos permitiu que as equipes de melhoria monitorassem variáveis críticas, controlassem os setups utilizados nos processos produtivos, e analisassem rapidamente os desvios de qualidade, o que favoreceu a resolução de problemas e a execução dos projetos de melhoria, corroborando com a percepção de Dombrowski *et al.* (2017).

A sinergia S12, Agilidade na Coleta de Dados, foi identificada nas quatro organizações. Nestas empresas existem equipamentos industriais conectados em rede, sensores inteligentes instalados em várias etapas dos processos, e bases de dados distribuídas, o que contribuiu com a acuracidade e a agilidade na coleta de dados, indo de encontro a visão de Tortorella e Fettermann (2018).

A sinergia S13, Confiabilidade dos Controles, foi identificada nos quatro casos. Com a implementação de soluções que utilizam redes industriais, IoT, rádio frequência, sensores inteligentes, big data e analytics, as empresas estudadas automatizaram parte de seus controles, e viabilizaram o monitoramento remoto, o que melhorou a confiabilidade dos dados gerados nos processos, coadunando com a visão de Liao *et al.* (2017).

A sinergia S14, Aprendizado, foi identificada nas empresas A, B e C. Nestas organizações as tecnologias machine learning, inteligência artificial, simulação e big data foram utilizadas para ajustar receitas de fabricação, aprimorar processos, e otimizar o uso de recursos, o que culminou com a melhoria da eficiência dos processos e com a melhoria dos resultados financeiros, corroborando com a visão Zhong *et al.* (2017).

A sinergia S15, Gestão do Conhecimento, foi identificada nas empresas A, B e C. Nestas empresas tecnologias como machine learning e analytics contribuíram com o aperfeiçoamento do conhecimento da força de trabalho, o que contribuiu com a disseminação do conhecimento e a capacitação das equipes de melhoria.

A sinergia S16, Simulação de Melhorias, foi evidenciada apenas na empresa B. Nesta organização foi identificado que a utilização da tecnologia machine learning resultou na melhoria de processos e produtos. Por meio desta tecnologia alguns equipamentos dessa empresa conseguiram aprender as práticas mais adequadas para otimizar os processos, o que resultou na redução do consumo de matérias-primas e na melhoria da qualidade dos produtos, corroborando com Zhong *et al.* (2017).

A sinergia S17, Antecipação da Identificação de Problemas de Qualidade, foi identificada nas quatro empresas. Nelas foram utilizadas tecnologias como sensoriamento remoto, inteligência artificial, analytics e big data com o intuito de alertar a força de trabalho sobre potenciais problemas de qualidade, o que contribui com a redução de custos e com a melhoria da satisfação dos clientes, corroborando com a visão de Zhong *et al.* (2017).

A sinergia S18, Antecipação da Identificação de Falhas de Equipamentos, foi identificada nas empresas A, B e C. Nelas foram encontradas evidências da utilização da predição para antecipação de problemas de manutenção a partir de sistemas de monitoramento

online, o que culminou com o aumento da confiabilidade dos equipamentos e reduziu os custos de manutenção, indo de encontro com a visão de Hartmann *et al.* (2018).

A sinergia S19, Aceleração dos Ganhos dos Projetos, foi identificada nas quatro empresas. Elas utilizaram tecnologias como inteligência artificial e big data para implementar o autoajuste de parâmetros de processo, o que contribui com a redução de problemas de qualidade, a melhoria da produtividade, e a aceleração dos projetos LSS, corroborando com a visão de Hartmann *et al.* (2017).

A sinergia S20, Ajuste Automático dos Níveis de Controle, foi identificada nas quatro empresas. Essas empresas utilizaram tecnologias como sensoriamento remoto, inteligência artificial e simulação, com o objetivo de otimizar processos e automatizar controles, o que resultou na melhoria da eficiência dos processos, coadunando com a visão de Vogel-Heuser e Hess (2016), e Hartmann *et al.* (2017) de que o controle dos processos pode transformar positivamente o ambiente e os resultados das organizações.

Em relação as dissonâncias, todas foram evidenciadas nas quatro empresas estudadas, conforme apresentado no Quadro 16. Os gestores destas empresas foram unânimes em reconhecer que as dissonâncias sistematizadas neste trabalho são desafios que precisam ser superados para que suas organizações possam colher todos os benefícios oriundos da integração do LSS à I4, o que torna essencial a adoção dos *drives* propostos na Seção 6 deste trabalho. Esses *drives* contribuem com o sucesso da integração, auxiliam os gestores na mitigação das dissonâncias e consequentemente contribuem com a melhoria da competitividade das empresas.

Quadro 16 – Dissonâncias entre o LSS e a I4 nos estudos de caso

Princípios da I4	Princípios do LSS	Dissonâncias Resultantes (I4 x LSS)			Empresas			
		I4	LSS	A	B	C	D	
Digitalização	Liderança	D1	Gestão de ambientes complexos	Ter ambientes enxutos	☑	☑	☑	☑
	Força de Trabalho	D2	Elevados investimentos em capacitação e tecnologia	Melhorar com baixo investimento	☑	☑	☑	☑
Conectividade	Processos	D3	Grande diversidade de protocolos	Padronizar processos	☑	☑	☑	☑
	Controles	D4	Elevados custos de manutenção	Reduzir desperdícios	☑	☑	☑	☑

Fonte: Produção do próprio autor

A dissonância D1, Gestão de Ambientes Complexos, é fruto da grande variedade de tecnologias e protocolos utilizados na I4, o que tem dificultado o gerenciamento dos processos

de manutenção das empresas estudadas em aspectos como gestão do conhecimento e aquisição de itens de reposição, corroborando com a visão de Tortorella e Fettermann (2017).

A dissonância D2, Elevados Investimentos em Capacitação e Tecnologia, é uma realidade enfrentada pelas empresas estudadas. Durante a condução de alguns projetos LSS que demandaram o uso de tecnologias digitais, as empresas estudadas investiram elevados recursos financeiros na capacitação de pessoal e na aquisição de softwares e equipamentos, o que contrapõe a essência do LSS de melhorar com simplicidade e baixos investimentos. Os gestores das empresas estudadas foram unânimes em reconhecer a necessidade de buscar o equilíbrio nos investimentos em tecnologia, o que segundo eles, pode ser alcançado por meio de estudos minuciosos sobre os impactos da adoção das tecnologias digitais, e principalmente, por meio da avaliação do retorno sobre os investimentos, coadunando com a visão de Villalba-Diez *et al.* (2019).

A dissonância D3, Grande Diversidade de Protocolos, foi observada em diversos projetos de implementação da I4 executados nas empresas estudadas. A variedade de fornecedores e tecnologias digitais disponíveis é uma realidade no mercado e a causa principal desta dissonância, o que dificultou a criação de ambientes tecnológicos mais enxutos e menos complicados, conforme preconizado pelo LSS.

A sinergia D4, Custos de Manutenção, foi observada nas quatro empresas estudadas. Nelas foi identificado um aumento elevado nos custos em decorrência da aquisição de sobressalentes para os componentes utilizados nas tecnologias da I4, e um incremento no número de profissionais de manutenção, o que levou as empresas no sentido oposto da proposta de simplicidade preconizada pelo LSS, corroborando com a visão de Sanders *et al.* (2016), e Oesterreich e Teuteberg (2016).

6.2.2 Boas práticas e principais dificuldades

O desenvolvimento e a análise cruzada dos estudos de caso permitiu identificar como as empresas estão capturando as oportunidades geradas pelas sinergias e como estão atuando para mitigar as dissonâncias.

As boas práticas ajudam as empresas a potencializar as sinergias e a mitigar as dissonâncias, maximizando assim as oportunidades geradas a partir da implantação e utilização do LSS integrado à I4. Já as dificuldades, assim como as dissonâncias, podem desmotivar as equipes de melhoria e até mesmo inviabilizar a integração do LSS à I4. Por este motivo é fundamental que as empresas conheçam estas dificuldades e atuem de forma sistêmica na sua

mitigação. A adoção de boas práticas pode contribuir com essa tarefa ajudando as empresas na mitigação das dissonâncias e das dificuldades.

O Quadro 18 apresenta as boas práticas e principais dificuldades relacionadas a integração do LSS a I4. Depois do quadro este trabalho apresenta uma análise das boas práticas e das dificuldades encontradas em cada uma das empresas, o que contribui com a consolidação da informação e ajudou no embasamento dos *drives* propostos na seção 7.

Quadro 17 – Boas práticas e dificuldades na integração do LSS à I4

	Boas práticas	Dificuldades
Empresa A	. Considerar a melhoria contínua como um valor; . Estratégia orientada para inovação e digitalização; . Reconhecer a I4 como habilitadora de oportunidades; . Parcerias com <i>startups</i> e instituições de ensino e pesquisa; . Criação de laboratório 4.0 para pesquisa e desenvolvimento; . Times específicos para melhoria e digitalização; . Investimento em tecnologias digitais; . Investimento em capacitação; . Foco em segurança cibernética; . Homologação de equipamentos, sistemas e protocolos de comunicação.	. Gestão de ambientes complexos; . Falta de mão de obra especializada; . Aumento do estoque de itens de reposição; . Elevados custos de implementação; . Elevados custos de manutenção.
Empresa B	. Definição da inovação como um pilar; . Estratégia orientada para inovação e digitalização; . Comprometimento com a inovação e P&D; . Times específicos para melhoria e digitalização; . Investimento em tecnologias digitais; . Investimento em capacitação; . Foco em segurança cibernética.	. Gestão de ambientes complexos; . Dificuldade para encontrar parceiros; . Aumento do estoque de itens de reposição; . Elevados custos de implementação; . Elevados custos de manutenção.
Empresa C	. Considerar a melhoria contínua como um valor; . Estratégia orientada para inovação e digitalização; . Times específicos para melhoria e digitalização; . Investimento em tecnologias digitais; . Investimento em capacitação; . Parceria com <i>startups</i> e instituições de ensino e pesquisa. . Uso intenso de tecnologias como um pilar; . Cultura organizacional orientada para a digitalização; . Incentivo ao uso de tecnologias digitais.	. Gestão de ambientes complexos; . Aumento do estoque de itens de reposição; . Falta de mão de obra especializada; . Elevados custos de implementação.
Empresa D	. Inovação como um dos elementos norteadores da governança; . Comprometimento com a inovação e P&D; . Investimento em tecnologias digitais; . Investimento em capacitação; . Times específicos para melhoria e digitalização;	. Gestão de ambientes complexos; . Aumento das horas extras dos plantonistas da I4; . Aumento do estoque de itens de reposição; . Elevados custos de implementação; . Elevados custos de manutenção.

Fonte: Produção do próprio autor

Considerar a melhoria contínua como um valor foi uma das boas práticas identificadas nas empresas estudadas. Esta boa prática está presente na empresa A, o que tem ajudado esta empresa na integração do LSS à I4. Existe na empresa A uma clara orientação para que projetos de melhoria sejam executados antes da digitalização de qualquer processo. De acordo com o gestor da área responsável pelo LSS, a digitalização de um processo que apresente muitos desperdícios poderá potencializar os problemas, tornando ineficaz a digitalização.

Ter uma estratégia orientada para a inovação e digitalização foi uma boa prática identificada nas empresas A, B, C. Com a adoção desta boa prática as empresas colocam a inovação e a digitalização como pilares de sustentação de suas ações, de forma que todas as iniciativas conduzidas nestas empresas procuram trabalhar a inovação e a digitalização como elementos essenciais e norteadores. O efeito prático desta boa prática, é que todos os novos projetos procuram implementar soluções digitais e inovadoras.

A boa prática reconhecer a I4 como habilitadora de oportunidades foi identificada apenas na empresa A. Essa empresa reconhece que a I4 pode transformar os processos e gerar novas oportunidades em todas as áreas, modificando as relações de trabalho e o relacionamento com clientes e fornecedores. Esse reconhecimento é mais que um discurso e de fato é traduzido no apoio da alta direção para projetos que envolvam inovação, melhoria e digitalização.

Parcerias com *startups* e instituições de ensino e pesquisa foi uma das boas práticas identificadas nas empresas A e C. Com essas parcerias as referidas empresas conseguiram agilizar o processo de desenvolvimento e implantação de novas tecnologias digitais, diminuindo também a curva de aprendizagem. Sempre que um projeto demanda uma nova tecnologia que ainda não foi utilizada nestas empresas, elas procuram no mercado *startups* e instituições de ensino que possam implementar e transferir os conhecimentos necessários.

A boa prática criação de laboratório 4.0 foi identificada na empresa A. Essa empresa criou um laboratório para testar e integrar tecnologias digitais. Sempre que um projeto demanda uma nova tecnologia, ou quando tecnologias precisam ser integradas, o laboratório é utilizado para realização de testes, validação e treinamento de colaboradores. O laboratório é coordenado pela equipe responsável pela I4, e todas as tecnologias testadas, validadas e implementadas, passam a ter uma cópia no laboratório para que futuras integrações possam ser testadas, evitando a necessidade de testes na linha de produção.

Times específicos para melhoria e digitalização foi identificado como uma boa prática nas quatro empresas. Com times específicos as empresas agilizam o processo de integração do LSS à I4, diminuem a curva de aprendizagem nas novas tecnologias, facilitam o processo de manutenção e garantem a sustentabilidade dos processos. Observa-se que em alguns casos as áreas responsáveis pela I4 também tinham outras atribuições, como por exemplo, a tecnologia da informação.

As boas práticas investimentos em tecnologias digitais e investimento em capacitação foram identificadas nas quatro empresas pesquisadas. Estes investimentos são planejados em sua maioria a partir do desdobramento de objetivos, e este, elaborado a partir do planejamento estratégico. Dessa forma, as áreas envolvidas com melhoria e digitalização definem a partir do

planejamento estratégico quais serão as demandas de investimento em novas tecnologias e capacitação. Todavia, existem exceções onde a demanda por novas tecnologias e/ou capacitações, surge de um problema ou oportunidade, não contemplados no planejamento estratégico.

Considerar a inovação como um pilar foi uma das boas práticas identificadas na empresa B. Nesta empresa os colaboradores são incentivados a criar processos inovadores, que somado a uma estratégia orientada para a digitalização, cria um cenário favorável para proposição de projetos de melhoria que envolvam o uso de tecnologias digitais. Considerar a inovação como um dos pilares de sustentação do negócio tem ajudado a empresa a manter-se como um dos principais *players* de seu segmento.

A boa prática comprometimento com a inovação e P&D está presente nas empresas B e D. Observa-se nessas empresas o comprometimento da alta administração com a inovação e com a pesquisa e desenvolvimento. Este comprometimento se reflete em investimentos e políticas internas voltadas para P&D. A empresa B por exemplo, possui um *hub* de inovação no Brasil com o objetivo de promover e acelerar soluções e processos inovadores relacionados à saúde e nutrição. O hub é um espaço de conexão, envolvendo colaboradores, clientes, *startups*, universidades e a sociedade como um todo. Este espaço também tem sido utilizado para P&D de tecnologias digitais que possam ser implementadas nas unidades da empresa.

A boa prática foco em segurança cibernética apareceu com destaque nas empresas A e B. Constatou-se nas duas empresas uma preocupação com o tema e um conjunto de ações direcionadas para seu desenvolvimento. A segurança cibernética tem relação com a criação de mecanismos para garantir a integridade das redes de comunicação corporativa e de automação. Na empresa A o time responsável pela I4 tem estudado e implementado ações para garantir a segurança das redes de comunicação e na empresa B a área responsável pela I4a tem o tema como uma de suas prioridades. Nos dois casos as empresas investem em pesquisa, capacitação de seus colaboradores, segmentação de redes e instalação de *firewalls* para aumentar o nível de segurança de suas redes de comunicação.

Implantação de cultura organizacional orientada para a digitalização é uma das boas práticas identificadas na empresa C. Na visão da Diretoria Executiva essa visão é fundamental para o sucesso do processo de transformação digital, sendo um pré-requisito, e um dos principais pilares que sustenta o processo. Neste sentido a empresa incentiva o uso de tecnologias digitais, o que corrobora com a implantação da cultura.

Gestão de ambientes complexos foi uma das dificuldades identificadas nas quatro empresas. Esta dificuldade ocorre em decorrência da diversidade de tecnologias e protocolos

de comunicação utilizadas na implantação da I4. As quatro empresas procuram padronizar algumas soluções, como por exemplo, microcomputadores, controladores lógicos programáveis e sistemas de supervisão, entre outros. Todavia, nem sempre é possível manter um padrão de equipamentos para todas as áreas e aplicações em função da especificidade de alguns processos, principalmente na área química.

Para dar credibilidade e transparência ao processo de padronização, a empresa A criou um procedimento de homologação de fornecedores e produtos. Este procedimento pode ser considerado como uma boa prática. Ele define como são escolhidos os padrões de equipamento, sistemas e protocolos de comunicação.

Elevados custos de implementação e elevados custos de manutenção foram duas dificuldades encontradas nas quatro empresas. Nessas empresas foi possível constatar a grande dependência que as empresas passaram a ter em relação ao uso das tecnologias digitais. Muitos processos são totalmente dependentes de tecnologias, redes de comunicação e sistemas computacionais, e a ausência de um destes elementos é capaz de interromper as operações destas organizações.

Diante deste cenário as empresas têm investido em redundância de redes de comunicação, redundância de equipamentos e um amplo estoque de peças e dispositivos reserva. Além disso, anualmente são provisionados valores expressivos nas contas contábeis de manutenção para aquisição de itens de reposição e liberação de horas extras.

Uma boa prática adotada pelas quatro empresas para mitigar estes custos é a criação de planos de manutenção preventiva. Estes planos definem as periodicidades e os procedimentos mais adequados para realização de atividades de manutenção, o que ajuda a evitar falhas que interrompam os processos de fabricação e/ou diminuam a vida útil das tecnologias digitais.

Nas empresas A e C foi reportada dificuldade para encontrar mão de obra especializada, principalmente nas regiões onde estão instaladas as unidades produtivas pesquisadas. Muitas tecnologias digitais, principalmente as emergentes, ainda não estão disponíveis nas grades das universidades e cursos técnicos. Para mitigar este problema estas empresas têm investido em parcerias com *startups* e instituições de ensino e pesquisa, com o intuito de capacitar a mão de obra interna, e desenvolver estudantes de engenharia e tecnologia da informação dos últimos anos de graduação.

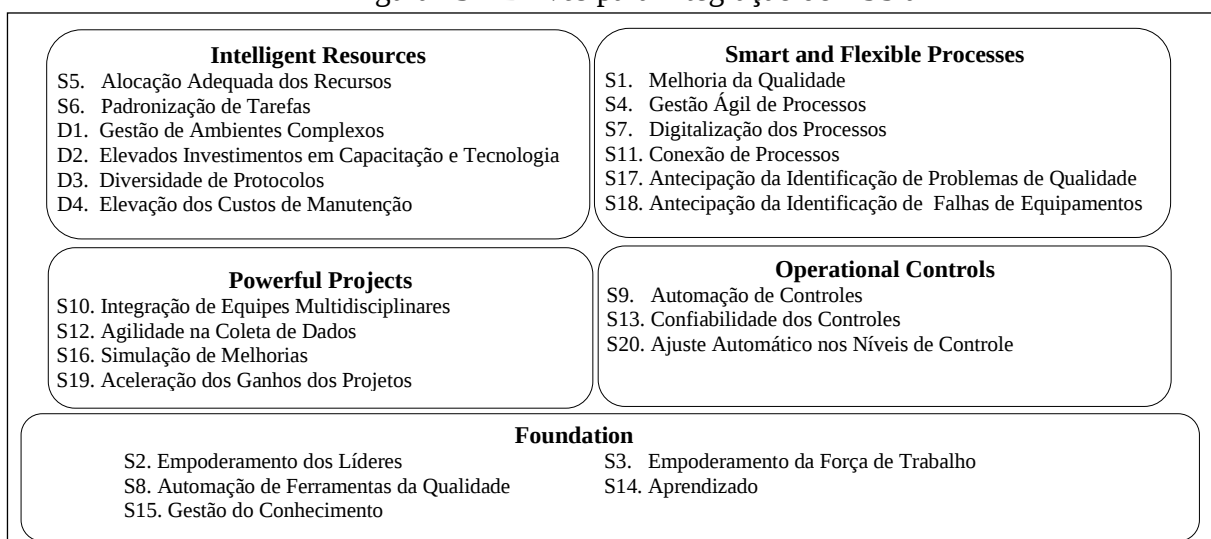
Na empresa A por exemplo, foram criadas parcerias que contemplam a realização de *hackathons* para resolução de problemas reais dentro das empresas. Estes eventos são maratonas de programação na qual estudantes se reúnem por um longo período, geralmente um ou dois dias, a fim de discutir ideias e desenvolver soluções para problemas reais

7 DRIVES PARA IMPLANTAÇÃO E GESTÃO DO LSS INTEGRADO À I4

Nesta seção são apresentados os *drives* para implantação e gestão do LSS integrado à I4. Esse *drives* foram formulados a partir da teoria científica, das informações obtidas nos quatro estudos de caso, da experiência do autor deste trabalho, e por fim, com a contribuição de especialistas convidados citados na Seção 3 deste trabalho de pesquisa. Esses especialistas contribuíram com a validação dos princípios do LSS e da I4, com a validação das sinergias e dissonâncias entre o LSS e a I4 e, por fim, com o refinamento dos *drives* propostos na presente seção. Para composição e organização dos *drives* propostos foram consideradas as afinidades observadas entre cada uma das sinergias e dissonâncias sistematizadas na Seção 5 deste trabalho. O principal objetivo dos *drives* aqui propostos é nortear as organizações para a adequada implantação e gestão do LSS integrado à I4, ajudando-as a potencializar os benefícios decorrentes dessa integração.

A integração do LSS à I4 representa um avanço na otimização dos processos industriais, e sua eficácia passa pela adoção de *drives* adequados a realidade das empresas. O principal objetivo dos *drives* é guiar as empresas no caminho da integração do LSS à I4, ajudando seus gestores na criação de ambientes fabris mais enxutos, ágeis e flexíveis. Os *drives* são a espinha dorsal da integração e auxiliam as empresas na maximização dos benefícios do LSS e da I4. A Figura 13 apresenta os cinco cluster criados para organização dos *drives* propostos. São eles: *Foundation*, *Intelligent Resources*, *Smart and Flexible Processes*, *Powerful Projects*, e *Operational Controls*.

Figura 13 – *Drives* para integração do LSS à I4



Fonte: Produção do próprio autor

A partir da Seção 7.1 são apresentados os *drives* contendo recomendações para integração do LSS à I4. Recomenda-se que esses *drives* sejam implantados na mesma ordem em que são apresentados a partir da Seção 7.1.

7.1 FOUNDATION

O *drive Foundation* suporta todos os demais, preparando as bases para a integração do LSS à I4 em empresas industriais de grande porte. Para operacionalização desse *drive* recomenda-se que as grandes empresas industriais tenham dois departamentos específicos para trabalhar de forma conjunta na integração do LSS à I4, sendo um responsável pela coordenação da equipe do LSS e outro responsável pela coordenação da equipe da I4, o que pode ser iniciado a partir da nomeação de dois gestores no nível tático para cada um destes departamentos. Líderes com experiência em produção e/ou qualidade, e formação LSS *Black Belt* são candidatos potenciais para coordenar o departamento responsável pelo LSS. Já líderes com experiência em automação e/ou tecnologia da informação e gerenciamento de projetos, são candidatos potenciais para coordenar o departamento responsável pela I4.

Recomenda-se que o departamento responsável pelo LSS tenha uma estrutura mínima de um *Green Belt* para cada trinta funcionários, e um *Black Belt* para cada cinco *Green Belts*. Os *Green Belts* são responsáveis pela liderança de projetos de melhoria menos complexos, que envolvam uma única área e/ou equipamento. Já os *Black Belts* são responsáveis pelo treinamento e suporte aos *Green Belts* e pela liderança de projetos de melhoria mais complexos que envolvam mais de uma área e/ou equipamento. No processo de capacitação desses *Belts* as organizações podem utilizar empresas de treinamento, consultorias especializadas ou mão de obra interna, caso existam profissionais com esses conhecimentos na empresa. No processo de seleção desses *Belts* deve-se dar oportunidade para colaboradores com aptidão e conhecimentos básicos em áreas como produção, qualidade, logística, suprimentos, e manutenção, entre outras áreas.

Já a estrutura do departamento responsável pela I4 pode variar em função da complexidade dos processos, sendo recomendado pelo menos um especialista em I4 para cada uma das unidades de manufatura da empresa e um especialista em I4 para atender especificamente as áreas de apoio como por exemplo, suprimentos, logística e planejamento. Esses especialistas são responsáveis pela avaliação, implantação e manutenção das tecnologias digitais mais adequadas em cada processo, e para sua capacitação as grandes empresas industriais devem recorrer a instituições de ensino, empresas de treinamento, consultorias

especializadas ou mão de obra interna, caso existam profissionais com esses conhecimentos necessários. Na seleção desses especialistas deve-se privilegiar os funcionários com aptidão e conhecimentos em áreas como automação, mecatrônica, eletroeletrônica, e/ou tecnologia da informação, entre outras áreas.

Uma segunda opção para coordenação das equipes do LSS e I4, é delegar essa função para os departamentos de Qualidade e Automação respectivamente, ou áreas similares, o que pode ser uma opção interessante, uma vez que essas áreas já estão estruturadas nas grandes empresas industriais. O departamento de Qualidade é a área responsável por garantir que os produtos e/ou serviços da empresa atendam os padrões especificados, e por aprimorar os métodos de produção, o que tem relação direta com os processos de melhoria, o que torna esse departamento um ótimo candidato para assumir a coordenação do LSS. Já o departamento de Automação é geralmente responsável por projetar e instalar sistemas digitais de controle e supervisão de processos industriais, o que tem aderência com as tecnologias digitais utilizadas na I4 e credencia o departamento de Automação para assumir a coordenação da I4. Nesse cenário, as grandes empresas industriais podem direcionar e capacitar parte da força de trabalho do departamento da Qualidade para atuar como *Green* e *Black Belt* nos projetos LSS, e capacitar parte da força de trabalho do departamento de Automação para atuar como especialista em I4, o que pode ser realizado respeitando-se as mesmas proporções citadas anteriormente.

Uma vez que a grande empresa industrial já tenha estruturado os departamentos responsáveis pela coordenação das equipes do LSS e da I4, sugere-se que os gestores desses departamentos promovam reuniões periódicas de alinhamento entre si, visando a implantação e disseminação de soluções tecnológicas voltadas para a automação de ferramentas de melhoria, padronização de tarefas, gestão do conhecimento, eliminação de desperdícios e redução da variabilidade dos processos, entre outras atividades. Isso deve melhorar a confiabilidade e a qualidade das informações sobre os processos, melhorar a assertividade dos líderes nos processos decisórios, aumentar a competitividade das empresas, e, conseqüentemente, potencializar as sinergias (S2) Empoderamentos dos Líderes, (S3) Empoderamento da Força de Trabalho, (S8) Automação de Ferramentas da Qualidade, (S14) Aprendizado, (S15) Gestão do Conhecimento (KOWANG *et al.*, 2016).

7.2 INTELLIGENT RESOURCES

O *drive Intelligent Resources* refere-se ao uso eficiente de recursos humanos, materiais, equipamentos e de infraestrutura, o que contribui com a otimização dos recursos e maximização dos resultados financeiros. Para operacionalizar esse *drive* recomenda-se que as equipes do LSS adquiram conhecimentos básicos sobre a aplicabilidade das principais tecnologias digitais utilizadas na I4, o que auxiliará esses profissionais na identificação das oportunidades mais adequadas para utilização dessas tecnologias no âmbito de seus projetos de melhoria, o que potencializará a sinergia (S5) Alocação Adequada de Recursos (BUSCHER; BORGER, 2017). Isso pode ser realizado por meio de capacitações simples que apresentem as principais tecnologias digitais, suas funcionalidades e aplicações. Essa capacitação pode ser realizada pela própria equipe responsável pela I4, caso ela tenha disponibilidade, ou por meio de parcerias com startups, empresas de consultoria, instituições de ensino e pesquisa, ou centros de inovação tecnológica.

Por outro lado, recomenda-se as equipes da I4 recebam uma capacitação básica sobre as ferramentas de melhoria e sejam convidados para participar como team members nos projetos LSS, o que contribuirá com a identificação das tecnologias mais adequadas para automatizar as coletas de dados, aperfeiçoar os controles sobre as variáveis críticas de processo e implantar sistemas a prova de falhas, potencializando a sinergia (S6) Padronização de Tarefas (KASPAR; SCHNEIDER, 2015). Essa capacitação pode ser realizada pela própria equipe responsável pelo LSS, caso ela tenha disponibilidade, ou por meio de parcerias empresas de consultoria, instituições de ensino e pesquisa, ou centros de inovação tecnológica.

A gestão de ambientes tecnológicos complexos e a grande diversidade de protocolos normalmente observados na I4 são pontos conflitantes com a proposta do LSS de implantar processos cada vez mais enxutos, otimizados e com baixa complexidade. Recomenda-se nesse contexto, que as grandes empresas industriais avaliem os custos e os benefícios para implantação de tecnologias digitais no âmbito dos projetos de melhoria LSS, e procurem implementar soluções com menor nível de complexidade possível, o que contribuirá com a integração do LSS à I4. Recomenda-se ainda a busca por fornecedores e tecnologias digitais que utilizem protocolos de comunicação compatíveis entre si, o que pode ajudar na integração dessas tecnologias, contribuir com a diminuição da complexidade dos ambientes, e por fim, reduzir os custos com manutenção e treinamento de pessoal. Estas ações devem contribuir de forma direta com a mitigação das dissonâncias (D1) Gestão de Ambientes Complexos, (D2)

Elevados Investimentos em Capacitação e Tecnologia, (D3) Diversidade de Protocolos e (D4) Elevação dos Custos de Manutenção (VILLALBA-DIEZ *et al.*, 2019).

7.3 SMART AND FLEXIBLE PROCESSES

O drive Smart and Flexible Processes objetiva tornar os processos industriais mais otimizados, inteligentes e flexíveis, o que viabiliza a customização em massa e conduz as grandes empresas industriais para a excelência no atendimento das demandas de qualidade, prazo e custos em mercados cada vez mais digitalmente conectados.

Para implantação desse *drive* é recomendado que as grandes empresas industriais façam o mapeamento de seus processos a fim de identificar as atividades que mais agregam valor a seus clientes, o que auxiliará os gestores a encontrarem os processos prioritários para a digitalização. A partir dessa priorização essas empresas devem trabalhar na eliminação dos desperdícios antes da implantação das tecnologias digitais, o que evitará que eventuais desperdícios sejam maximizados. Essa priorização também favorecerá o compartilhamento de dados, a melhoria da previsibilidade sobre os problemas de qualidade e falhas de equipamento, a redução da interferência humana e a conexão dos processos, culminando com a criação de ambientes produtivos mais flexíveis e inteligentes.

Adoção das diretrizes propostas nesse *drive* contribuirão com a potencialização das sinergias (S1) Melhoria da Qualidade, (S4) Gestão Ágil de Processos, (S7) Digitalização dos Processos, (S11) Conexão de Processos, (S17) Antecipação da Identificação dos Problemas de Qualidade e (S18) Antecipação da Identificação das Falhas de Equipamentos (ALHURAISH *et al.*, 2017; CHIARINI; KUMAR, 2021).

7.4 POWERFUL PROJECTS

O *drive Powerful Projects* refere-se ao empoderamento das equipes dos projetos de melhoria LSS a partir do uso de tecnologias digitais. Para operacionalização desse drive é recomendado que as grandes empresas industriais criem a estrutura organizacional proposta no drive Foundation (seção 6.1), o que favorece a gestão por projetos e contribui com a integração das equipes envolvidas com o LSS e a I4, facilitando o gerenciamento de atividades, recursos humanos, materiais e equipamentos, e culminando com a aceleração das ações de melhoria. Recomenda-se ainda o estabelecimento de parcerias com instituições de ensino e startups especializadas em tecnologias da I4 a fim de agilizar o aprendizado das equipes envolvidas

com o LSS e a I4, o que contribuirá com o desenvolvimento das habilidades comportamentais (*soft skills*) e competências técnicas (*hard skills*) necessárias para atuação dessas equipes.

Recomenda-se também que os integrantes dos projetos de melhoria avaliem se os processos estão devidamente preparados para receber as tecnologias digitais utilizadas na I4, ou se a prioridade deve ser a eliminação de desperdícios antes da digitalização dos processos, o que neste caso pode direcionar as empresas para a implementação de tecnologias básicas voltadas apenas para coleta de dados e integração com ferramentas de melhoria como Cartas de Controle, Mapas de Fluxo de Valor (VSM) e Desdobramento da Função Qualidade (QFD). Essa implementação de tecnologias básicas deve contribuir com a eliminação de desperdícios e pode criar ambientes tecnológicos menos complicados, ao passo que as equipes adquirem maior experiência e fluência na utilização das tecnologias digitais, o que deve facilitar o gerenciamento dessas tecnologias em um primeiro momento, criando bases sólidas para a implantação de aplicações mais sofisticadas no futuro.

As recomendações apresentadas neste drive potencializarão as sinergias (S10) Integração de Equipes Multidisciplinares, (S12) Agilidade na Coleta de Dados, (S16) Simulação de Melhorias e (S19) Aceleração dos Ganhos dos Projetos (HARTMANN *et al.*, 2017).

7.5 OPERATIONAL CONTROLS

O *drive Operational Controls* refere-se à utilização de tecnologias digitais para implantação de controles inteligentes, o que contribuirá com a melhoria da efetividade dos projetos LSS, com a maior estabilidade dos processos, e com a melhoria da qualidade dos produtos e serviços.

Para operacionalizar esse *drive* recomenda-se que as grandes empresas industriais criem as condições técnicas e organizacionais necessárias para que as equipes do LSS e I4 primeiramente identifiquem os processos prioritários, que podem ser aqueles que agregam maior valor para os clientes e/ou aqueles que estão com maior defasagem em relação ao nível de qualidade especificado, e somente depois implementem as tecnologias digitais mais adequadas e aderentes a cada um desses processos, o que tornará mais assertiva a implantação de controles inteligentes para as variáveis críticas de processo.

Recomenda-se também que as grandes empresas industriais estabeleçam parcerias com fornecedores de tecnologia digitais e/ou instituições de ensino e pesquisa com o objetivo de

criar ou locar laboratórios para criação de tecnologias de controle inteligente, o que permitirá a realização de testes para a homologação dessas tecnologias antes de sua implementação nos processos físicos. Esses laboratórios também podem ser utilizados como centros de treinamento para capacitação avançada das equipes internas envolvidas com a implantação das tecnologias digitais e para capacitação básica das equipes do LSS que utilizarão essas tecnologias, o que também contribuirá com o desenvolvimento das competências técnicas dessas equipes. Por fim, recomenda-se que as grandes empresas industriais armazenem e integrem as informações de seus processos em grandes bases de dados (big data), o que contribuirá com a implantação de soluções voltadas para o aprendizado de máquina e autoajuste de variáveis críticas de processo, viabilizando a criação de controles cada vez mais robustos.

As ações propostas neste drive potencializarão as sinergias (S9) Automação de Controles, (S13) Confiabilidade de Controles e (S20) Ajuste Automático nos Níveis de Controle (TORTORELLA; FETTERMANN, 2018).

8 CONCLUSÃO

O cenário econômico mundial exige que os gestores das grandes empresas industriais definam estratégias que ajudem a manter suas organizações competitivas frente à concorrência. Essas estratégias precisam contribuir com a eliminação dos desperdícios e com a redução da variabilidade dos processos, o que pode tornar as operações industriais mais ágeis e flexíveis perante mercados cada vez mais digitalmente conectados, exigentes e seletivos.

A globalização, a concorrência e a disponibilização de um volume cada vez maior de informações sobre os produtos e os serviços são fatores contribuintes para a constante evolução no comportamento dos consumidores. A compreensão desse cenário e a definição de estratégias para melhorar a competitividade das grandes empresas industriais são algumas das questões que devem estar presentes na agenda dos gestores dessas organizações. Estratégias para tornar essas organizações mais competitivas estão disponíveis na literatura científica e no meio empresarial. Todavia, novas estratégias se fazem necessárias para fazer frente à evolução tecnológica, a concorrência e à constante mudança no comportamento dos consumidores.

O LSS integrado à I4 é um tema recente e pode ser uma dessas estratégias. Nesse contexto, o objetivo desta tese é propor um conjunto de *drives* que potencializem a integração do LSS à I4 e ajudem as grandes empresas do setor industrial a melhorarem sua competitividade. Na literatura científica, identificam-se outros trabalhos que abordam essa integração, entretanto, de forma mais generalista e sem um aprofundamento e uma discussão mais ampla sobre as sinergias e dissonâncias entre o LSS e a I4.

Para consecução deste objetivo o pesquisador utilizou um método múltiplo composto por Revisão da Literatura científica, Análise de Conteúdo e execução de quatro Estudos de Caso em grandes empresas do setor industrial que estão integrando o LSS à I4. A Revisão da Literatura científica contribuiu com a composição do arcabouço teórico. A Análise de Conteúdo forneceu elementos para a sistematização dos princípios norteadores do LSS e da I4, o que viabilizou o cruzamento destes princípios e permitiu a sistematização das sinergias e dissonâncias entre os temas.

Já a execução dos Estudos de Caso permitiu ao pesquisador conhecer de forma abrangente a realidade das empresas estudadas, o que contribuiu com a identificação de boas práticas e dificuldades no processo de integração do LSS à I4. A sistematização das sinergias e dissonância, somado as informações obtidas nos quatro estudos de caso, a experiência do autor deste trabalho, e as contribuições de um grupo de especialistas, viabilizaram a proposição de um conjunto inédito de *drives* contendo recomendações para a integração do LSS à I4. Esses

drives foram estruturados de acordo com a afinidade entre as sinergias e dissonâncias, o que permitiu ao autor responder à questão de pesquisa “de que forma é possível potencializar a integração do LSS à I4 considerando os aspectos sinérgicos e dissonantes entre os temas, a fim de gerar vantagem competitiva para as grandes empresas industriais?”.

Quanto ao método utilizado neste trabalho, os estudos de caso mostraram-se adequados ao desenvolvimento da pesquisa, que é classificada como aplicada, exploratória e qualitativa. Realizar uma pesquisa qualitativa com base em estudos de caso auxiliou o pesquisador na obtenção de informações relevantes e confiáveis para a consecução dos *drives* propostos.

Assim, destaca-se que a maior contribuição desta tese está na proposição de uma nova estratégia capaz de guiar os gestores de grandes empresas industriais na superação de desafios e na melhoria da competitividade de suas organizações, por meio da integração do LSS à I4, de forma que sejam potencializadas as sinergias e mitigadas as dissonâncias entre os dois temas.

Este trabalho identificou um alinhamento quase simétrico entre os princípios do LSS e da I4, o que justifica o potencial de integração identificado na literatura científica e corroborado em campo nos quatro estudos de caso. Esse cenário reforça a grande oportunidade ao alcance das grandes empresas industriais, que a partir dessa integração podem objetivar a melhoria do desempenho operacional e financeiro de suas organizações.

Assim sendo, acredita-se que o principal objetivo desta tese foi satisfatoriamente atingido com a proposição dos *drives* apresentados na Seção 7. Nesse sentido, além de cumprir seu objetivo principal, os resultados desta pesquisa também atendem aos objetivos específicos que foram propostos na Seção 1 do presente trabalho: i) sistematizar os princípios do LSS e da I4 e apresentar a relação teórica entre eles a partir de revisão sistemática da literatura científica; ii) sistematizar as sinergias e as dissonâncias entre o LSS e a I4, e considerá-las como elementos chave na proposição dos *drives*; iii) identificar em campo a relação entre o LSS e a I4 a partir de quatro estudos de casos realizados em grandes empresas do setor industrial brasileiro; e iv) identificar e analisar as boas práticas e as principais dificuldades em relação à implantação e à gestão do LSS integrado à I4, a partir da análise cruzada dos casos.

Em consonância com os objetivos estabelecidos, esta tese identificou na literatura científica, as relações teóricas entre os princípios do LSS e da I4, e constatou que os temas são de fato complementares e convergem para uma mesma direção, a melhoria da competitividade das organizações. Esta tese identificou ainda, que a integração é viável e pode gerar benefícios concretos para as empresas industriais.

Neste trabalho conclui-se que a integração do LSS à I4 pode ser estudada sob duas óticas distintas e complementares. Primeiro, o LSS pode contribuir com a efetividade da implantação de novas tecnologias digitais, maximizando o retorno sobre os investimentos, a partir da eliminação de desperdícios, antes da implantação dessas tecnologias, o que deve tornar mais assertivo o processo de digitalização. Na prática, isso significa que os processos primeiro devem se tornar *Lean*, para depois serem digitalizados.

Segundo, a I4 pode acelerar e dar maior efetividade aos projetos de melhoria LSS, o que pode ser atingido por meio da utilização de tecnologias digitais para agilizar e dar maior confiabilidade às coletas de dados, municiar as ferramentas de melhoria com dados confiáveis, simular as melhorias em ambientes digitais antes de sua efetivação nos ambientes físicos e implementar controles automatizados que contribuam com a manutenção dos resultados alcançados nos projetos de melhoria.

A combinação das práticas e ferramentas utilizadas no LSS com as tecnologias empregadas na I4 pode efetivamente ajudar os gestores na melhoria do desempenho de suas organizações, potencializando o que as duas estratégias, LSS e I4, tem de mais efetivo. Nesse sentido, esta tese identificou 20 sinergias entre os temas, o que evidencia as vantagens dessa integração para as empresas industriais.

Além disso, a tese identificou quatro divergências entre os temas, o que pode dificultar o processo de integração, torná-lo mais oneroso do ponto de vista financeiro e desmotivar as equipes de melhoria e digitalização envolvidas. Nesse contexto, fica evidente a importância dos *drives* propostos no presente trabalho de pesquisa, pois estes podem contribuir com a potencialização das sinergias e com a mitigação das dissonâncias, o que maximizará todos os benefícios decorrentes da integração entre o LSS e a I4, e consequentemente ajudará as grandes empresas industriais na melhoria de sua competitividade .

A sistematização dos princípios do LSS e da I4, e a identificação das relações teóricas entre os temas a partir da literatura científica, somado a sistematização das sinergias e dissonâncias por meio do cruzamento desses princípios, embasaram a realização do estudo de caso piloto, o que viabilizou a validação do protocolo de coleta de dados.

Após a realização do estudo de caso piloto realizado em uma empresa do setor químico com atividades no Brasil, foram realizados outros três estudos em empresas do setor químico, siderúrgico e aeroespacial respectivamente, todas com operações no Brasil, o que tornou possível a identificação de elementos chave no processo de integração do LSS à I4, sendo esses primordiais para a proposição dos *drives*.

Na condução e execução dos estudos de caso, este trabalho evidenciou que a maioria das sinergias sistematizadas na Seção 5 estavam presentes em pelo menos três, das quatro empresas estudadas. Este trabalho identificou ainda que: i) dezesseis sinergias estavam presentes em quatro empresas estudadas, ii) três sinergias estavam presentes em pelo menos três empresas, e iii) apenas uma sinergia estava presente em uma única empresa, o que coaduna com a visão de muitos autores identificados na literatura científica, quanto ao potencial de integração entre o LSS e a I4.

Em relação as dissonâncias sistematizadas e apresentadas nesta tese, identificou-se que todas estavam presentes nas quatro empresas estudadas, e que elas são objeto de preocupação para os gestores das quatro empresas, existindo um senso comum entre eles, sobre a necessidade das mesmas serem mitigadas para que suas organizações consigam extrair o máximo da integração entre o LSS e a I4.

Neste sentido, um conjunto de boas práticas e dificuldades foram identificadas nos quatro casos estudados, sendo estas fundamentais para a proposição dos *drives*. As boas práticas ajudam as empresas a maximizar as sinergias e a mitigar as dissonâncias, potencializando assim as oportunidades geradas a partir da integração do LSS à I4.

Boas práticas são iniciativas estabelecidas para garantir a eficiência e a eficácia dos processos. Elas são fundamentais para promover a exequibilidade, a consistência e a qualidade na condução de projetos e atividades chave. A sua adoção ajuda a evitar erros comuns, melhora a produtividade e garante que as atividades sejam realizadas de forma padronizada. Além disso, as boas práticas facilitam a colaboração e a comunicação entre os diversos membros de uma organização. Portanto, a sua adoção é essencial para o sucesso de qualquer organização, o que justifica a sua utilização na composição dos *drives* apresentados neste trabalho.

Já as dissonâncias, como citado anteriormente, podem desmotivar as equipes e até mesmo inviabilizar a integração do LSS à I4. Por esta razão, é essencial que as empresas reconheçam os aspectos dissonantes existentes entre o LSS e a I4, e atuem de forma sistêmica na sua mitigação. Nesse contexto, a adoção de boas práticas também pode contribuir com essa tarefa, ajudando as empresas na execução de ações que mitiguem as dissonâncias e favoreçam o processo de integração do LSS à I4.

Nos casos estudos evidenciou-se que projetos LSS têm contribuído com a implantação da I4 a partir da identificação dos desperdícios e das ineficiências dos processos, indicando de forma precisa os locais mais adequados para implementação de tecnologias digitais, e estabelecendo ações que tornem os processos mais enxutos antes da adoção dessas tecnologias. Dessa forma, é crucial que projetos de melhoria LSS sejam executados antes da digitalização

dos processos, o que, como já citado nesta tese, deve contribuir com a maximização do retorno sobre os investimentos em tecnologia. Por outro lado, evidenciou-se que as tecnologias digitais utilizadas na I4 contribuem de forma direta com os projetos de melhoria LSS, pois digitalizam os processos e fornecem dados confiáveis para esses projetos, o que reduz o tempo de coleta de dados, melhora e dá maior credibilidade aos processos de análise, e dá maior robustez aos controles das variáveis críticas de processo.

O trabalho preencheu a lacuna científica que enfatizava a necessidade de pesquisas apresentarem soluções para potencializar a integração do LSS à I4, maximizando as sinergias e mitigando as dissonâncias existentes entre os temas, a partir de pesquisas empíricas que considerem a realidade das empresas. A principal contribuição científica deste artigo é a sistematização teórica de um conjunto de aspectos sinérgicos e dissonantes entre o LSS e a I4, a comprovação desses aspectos em quatro grandes empresas industriais e, por fim, a corroboração em campo da relevância da integração entre o LSS e a I4 para essas empresas, o que abre espaço para novas pesquisas científicas explorarem e contribuírem com o desenvolvimento do tema. Quanto à sua contribuição aplicada, este trabalho disponibiliza um conjunto de informações relevantes que auxilia os gestores na integração do LSS à I4, o que auxilia esses gestores na criação de ambientes empresariais mais inteligentes, enxutos e flexíveis, e gera importante vantagem competitiva em relação à concorrência.

Embora este estudo faça uma contribuição valiosa quanto à integração do LSS à I4, ainda existe uma margem significativa para o desenvolvimento e o aprofundamento do tema. É recomendado que estudos futuros analisem um número maior de trabalhos científicos e realizem um número maior de estudos de caso, o que pode contribuir com a identificação de novos aspectos sinérgicos e/ou dissonantes entre o LSS e a I4, e complementar os *drives* propostos neste trabalho de pesquisa. Recomenda-se também a realização de um Survey para uma coleta ampla de dados em empresas industriais de grande porte, o que pode viabilizar análises quantitativas em relação ao conjunto de empresas estudadas, permitindo a identificação de tendências e o estabelecimento de correlações.

Como resultado deste trabalho foram realizadas palestras no Simpósio de Engenharia Gestão e Inovação (Universidade de São Paulo/2020), na International Society of Automation (ISA/2021), em Escolas Técnicas do Centro Paula Souza (2020/2021), na Faculdade de Tecnologia de Guaratinguetá (FATEC/2021), e no Centro Universitário Salesiano de São Paulo (Unisal/2022).

O trabalho também viabilizou a publicação do artigo científico intitulado “*Good practices and hindrances to integrate Lean Six Sigma with Industry 4.0 in the chemical sector*”

na 5th Conferência Internacional de Engenharia da Qualidade e Gestão, na Universidade do Minho em Portugal (2022), e a publicação de um segundo artigo intitulado “Empresas inteligentes, enxutas e flexíveis: boas práticas para integração do Lean Six Sigma à I4” no ENEGEP 2023.

Outro artigo intitulado “*Drives to integrate Lean Six Sigma and Industry 4.0: building new paths to improve the enterprise competitiveness*” foi submetido no periódico internacional *International Journal of Lean Six Sigma*”. O artigo recebeu sugestões de melhoria e elas serão implementadas para uma posterior submissão no início de 2024. Por fim, um outro artigo denominado “*The symbiosis of Lean Six Sigma and Industry 4.0: drives to improve the enterprise competitiveness*” está em fase final de elaboração e também será submetido no início de 2024 no periódico *Production Planning and Control*.

REFERÊNCIAS

- ABUBAKAR, F. A.; SUBARI, K.; DARIL, M. A. M. Critical success factors of lean six sigma deployment: a current review. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 6, n. 4, p. 366-384, 2015.
- AGUINIS, H.; CASCIO, W. F.; RAMANI, R. S. Science's reproducibility and replicability crisis: international business is not immune. **Journal of international business studies**, London, v. 48, n. 6, p. 653-663, 2017,
- ALBLIWI, S. *et al.* Critical failure factors of lean six sigma: a systematic literature review. **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v. 31, n. 9, p. 1012–1030, 25 set. 2014.
- ALBLIWI, S.; ANTONY, J.; ABDUL, S. A systematic review of lean six sigma for the manufacturing industry. **Business process management journal**, Bingley, v. 21, n. 3, p. 665–691, 2015.
- ALHURAISH, I.; ROBLEDO, C.; KOBİ, A. A comparative exploration of lean manufacturing and Six Sigma in terms of their critical success factors. **Journal of cleaner production**, Amsterdã, v. 164, p. 325-337, 2017.
- ALI, S. M. *et al.* Barriers to lean six sigma implementations in the supply chain: a model. **Computers and industrial engineering**, Amsterdã, v. 2020, n. 1, 2020.
- ANTONY, J. Six Sigma vs Lean: some perspectives from leading academics and practitioners. **International journal of productivity and performance management**, Bingley, v. 60, n. 2, p. 185–190, 2011.
- ANTONY, J. *et al.* Lean six sigma for higher education institutions. **International journal of productivity and performance management**, Bingley, v. 61, n. 8, p. 940–948, 2012.
- ANTONY, J. Readiness factors for the lean six sigma journey in the higher education sector. **International journal of productivity and performance management**, Bingley, v. 63, n. 2, p. 257-264, 2014.
- ANTONY, J. Lean six sigma for higher education. **International journal of productivity and performance management**, Bingley, v. 66, n. 5, p. 574-576, 2017.
- ANTONY, J.; RODGERS, B.; CUDNEY, E. A. Lean six sigma in policing services: case examples, lessons learnt and directions for future research. **Total quality management and business excellence**, London, v. 30, p. 613-625, 2019.
- ARCIDIACONO, G.; PIERONI, A. The revolution of lean six sigma 4.0. **International journal on advanced science, engineering and information technology**, Indonésia, v. 8, n. 1, p. 141, 2018.
- AZADEGAN, A. *et al.* The effect of environmental complexity and environmental dynamism on lean practices. **Journal of operations management**, New Jersey, v. 31, n. 4, p. 193-212, 2013.

BANAWI, A.; BILEC, M. M. A framework to improve construction processes integrating lean, green and Six Sigma. **International journal of construction management**, London, v. 14, n.1, p. 45-55, 2014.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. 3 ed. São Paulo: Edições Setenta, 2011.

BAUER, W. *et al.* Transforming to a hyper-connected society and economy – towards an industry 4.0. **Procedia manufacturing**, Amsterdã, v. 3, p. 417-424, 2015.

BHAMU, J.; SANGWAN, K. S. Lean manufacturing: literature review and research issues. **International journal of operations and production management**, Bingley, v. 34, n. 7, p. 876–940, 2014.

BHAT, V. S.; BHAT, S.; GIJO; E. V. Simulation-based lean six sigma for industry 4.0: an action research in the process industry", **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v. 38 n. 5, p. 1215-1245, 2021.

BHAT, S.; GIJO, E. V; JNANESH, N. A. Application of lean six sigma methodology in the registration process of a hospital. **International journal of productivity and performance management**, Bingley, v. 63, n. 5, p. 613–643, 2014.

BORNMANN, L.; MOYA-ANEGÓN, F.; LEYDESDORFF, L. The new excellence indicator in the world report of the SCImago institutions rankings 2011. **Journal of informetrics**, Amsterdã, v. 6, n. 3, p. 333-335, 2012.

BUER, S.V.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, F. T. S. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. **International journal of production research**, London, v. 56, n. 8, p. 2924-2940, 2018.

BUSCHER, U.; BÖGER, F. Wie sich industrie 4.0 und lean gegenseitig befruchten. **ZWF zeitschrift für wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 112, n. 7–8, p. 518–521, 2017.

CALLON, M.; COURTIAL, J. P.; LAVILLE, F. Co-word. analysis as a tool for describing the network of interactions between basic *and* technological research: the case of polymer chemistry. **Scientometrics**, Budapeste, v. 22, n. 1, p. 155–205, 1991.

CHAKRAVORTY, S. S.; SHAH, A. Lean six sigma: an implementation experience. **European journal of industrial engineering**, Leeds, v. 6, n. 1, p. 118-s137, 2012.

CHEN, B.; WAN, J.; SHU, L. E. I.; MEMBER, S. Smart factory of industry 4.0: key technologies, application case, and challenges. **IEEE access**, Piscataway, v. 6, n. 1, p. 6505–6519, 2018.

CHENG, C. Y.; CHANG, P. Y. Implementation of the lean six sigma framework in nonprofit organisations: a case study. **Total quality management and business excellence**, Leeds, v. 23, n. 4, p. 431–447, 2012.

- CHERRAFI, A. *et al.* A framework for the integration of green and lean six sigma for superior sustainability performance. **International journal of production research**, London, v. 55, n. 15, p. 4481–4515, 2017.
- CHIARINI, A. Japanese total quality control, TQM, deming's system of profound knowledge, BPR, lean and six sigma: comparison and discussion. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 2, n. 4, p. 332-355, 2011.
- CHIARINI, A. Improvement of OEE performance using a lean six sigma approach: an Italian manufacturing case study. **International journal of productivity and quality management**, Geneva, v. 16, n. 4, p. 416, 2015.
- CHIARINI, A.; KUMAR, M. Lean six sigma and industry 4.0 integration for operational excellence: evidence from italian manufacturing companies. **Production planning and control**, London, v. 32, n. 13, p. 1084-1101, 2021.
- CHUGANI, N. *et al.* Investigating the green impact of lean, six sigma and lean six sigma: A systematic literature review. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 8, n. 1, p. 7-32, 2017.
- CIMA, R. R. *et al.* Use of lean and six sigma methodology to improve operating room efficiency in a high-volume tertiary-care academic medical center. **Journal of the american college of surgeons**, Piscataway, v. 213, n. 1, p. 83-92, 2011.
- COBO, M. J. *et al.* SciMAT: a new science mapping analysis software tool. **Journal of the american society for information science and technology**, Leeds, v. 63, n. 8, p. 1609–1630, 2012.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA BRASILEIRA. **Relatório confederação nacional da indústria**. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2017/5/importancia-da-industria> 2020. Acesso em: 20 nov. 2020.
- CORBETT, L. M. Lean six sigma: the contribution to business excellence. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 2, n. 2, p. 118–131, 2011.
- DALENOGARE, L. S. *et al.* The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International journal of production economics**, Amsterdã, v. 204, n. 1, p. 383-394, 2018.
- DOMBROWSKI, U.; RICHTER, T.; KRENKEL, P. Wechselwirkungen von ganzheitlichen produktionssystemen und industrie 4.0: eine use-case-analyse. **ZWF zeitschrift fuer wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 112, n. 6, p. 430–433, 2017.
- DOMBROWSKI, U.; RICHTER, T.; KRENKEL, P. Interdependencies of industrie 4.0 and lean production systems: a use cases analysis. **Procedia manufacturing**, Amsterdã, v. 11, n. 6, p. 1061–1068, 2017.
- DRATH R.; HORCH A. Industrie 4.0: hit or hype? **IEEE industrial electronics magazine**, Piscataway, v.1, n.1, 2014.

DROHOMERETSKI, E. *et al.* Lean six sigma: an analysis based on operations strategy. **International journal of production research**, London, v. 52, n. 3, p. 804–824, 2014.

ENKE, J. *et al.* Der weg zur lean quality 4.0. **ZWF zeitschrift für wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 112, n. 9, p. 612–615, 2017.

ESMAEILIAN, B.; BEHDAD, S.; WANG, B. The evolution *and* future of manufacturing: a review. **Journal of manufacturing systems**, Amsterdã, v. 39, p. 79–100, 2016.

FELIZZOLA JIMÉNEZ, H.; LUNA AMAYA, C. Lean six sigma in small and medium enterprises: a methodological approach. **Ingeniare**, Arica, v. 22, n. 2, p. 263–277, 2014.

FLOR VALLEJO, V. *et al.* Development of a roadmap for lean six sigma implementation and sustainability in a Scottish packing company. **TQM journal**, Leeds, v. 32, n. 6, p. 1263–1284, 2020.

GANZARAIN, J.; ERRASTI, N. Three stage maturity model in SMEs towards industry 4.0. **Journal of industrial engineering and management**, Novi Sad, v. 9, n. 5, p. 1119–1128, 2016.

GARZA-REYES, J. A. *et al.*, A lean six sigma framework for the reduction of ship loading commercial time in the iron ore pelletising industry. **Production planning and control**, London, v. 27, n. 13, p. 1092–1111, 2016.

GDR REPORT. **Relatório anual da empresa gerdau referente ao ano de 2020**. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/2021-08/Gerdau2020Report.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2023

GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward industry 4.0. **Journal of manufacturing technology management**, Bingley, v. 29, n. 6, p. 910–936, 2018.

GHOBAKHLOO, M.; FATHI, M. Industry 4.0 and opportunities for energy sustainability. **Journal of cleaner production**, Amsterdã, v. 295, n. 1, 2021.

GRAVAGNUOLO, A.; ANGRISANO, M.; GIRARD, L.F. Circular economy strategies in eight historic port cities: criteria and indicators towards a circular city assessment framework. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 1, p. 2–24, 2019.

HABIDIN, N. F.; YUSOF, S. M. Critical success factors of lean six sigma for the Malaysian automotive industry. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 4, n. 1, p. 60–82, 2013.

HARRISON, R.; VERA, D.; AHMAD, B. Engineering methods and tools for cyber-physical automation systems. **Proceedings of the IEEE**, Piscataway, v. 104, n. 5, p. 973–985, 2016.

HARTMANN, L.; MEUDT, T. Wertstromdesign 4.0. **ZWF zeitschrift für wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 113, n. 1, p. 393–397, 2018.

HARTMANN, L. *et al.* Value stream method 4.0: holistic method to analyse and design value streams in the digital age. *In: CONFERENCE OF ENVASING THE FUTURE MANUFACTURING, DESIGN, TECHNOLOGIES AND SYSTEMS IN INNOVATION ERA*, 6, 2018, Amsterdã. **Procedia CIRP**, Amsterdã, v. 78, n. 1, p. 249-254, 2018.

HILTON, R. J.; SOHAL, A. A conceptual model for the successful deployment of lean six sigma. **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v. 29, n. 1, p. 54–70, 2012.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Computers in industry 4. 0 and the current status as well as prospects on logistics. **Computers in industry**, Amsterdã, v. 89, p. 23–34, 2017.

HOZDIĆ, E. Smart factory for industry 4.0: a review. **International journal of modern manufacturing technologies**, Lasi, v. 7, n. 1, p. 28-35, 2015.

IVANOV, D. *et al.* A dynamic model *and* an algorithm for short- term supply chain scheduling in the smart factory industry 4. 0. **International journal of production research**, London, v. 7543, n. 1, p. 1–17, 2016.

IVANOV, D. *et al.* A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0. **International journal of production research**, London, v. 54, n. 2, p. 386–402, 2016.

JADHAV, J. R.; MANTHA, S. S.; RANE, S. B. Exploring barriers in lean implementation. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 5, n. 2, p. 122-148, 2014.

JAYARAM, A. Lean six sigma approach for global supply chain management using industry 4.0 and IIoT. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY COMPUTING AND INFORMATICS*, 2, 2016, Greater Noida. **Proceedings [...]**. Greater Noida: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016.

JEROEN, B. *et al.* Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. **Quantitative science studies**, Cambridge, v. 1, n. 1, p. 377-386, 2020.

JIMÉNEZ, H.; AMAYA, C. L. Lean six sigma in small and medium-sized enterprises: a methodological approach. **Revista produção online**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 160-183, 2014.

JULIANI, F.; OLIVEIRA, O. J. Synergies between critical success factors of lean six sigma and public values. **Total quality management and business excellence**, Leeds, v. 3363, n. 10, p. 1–15, 2017.

JULIANI, F.; OLIVEIRA, O. J. Lean six sigma principles and practices under a management perspective. **Production planning and control**, London, v. 31, n. 15, p. 1223-1244, 2020.

KAGERMANN, H. *et al.* **Recommendations for implementing the strategic initiative industry 4.0**. Munich: Acatech, 2013. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>. Acesso em: 2 Dec. 2023

KAMBLE, S.; GUNASEKARAN, A.; DHONE, N. C. Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in indian manufacturing companies. **International journal of production research**, London, v. 58, n. 5, p. 1319-1337, 2020.

KANDORI, M. Replicability of experimental data and credibility of economic theory. **Japanese economic review**, Tokyo, v. 69, n. 1, p. 4-25, 2018.

KANG, H. S. *et al.* Smart manufacturing: past research, present findings, and future directions. **International journal of precision eng. and manufacturing green technology**, Midtown, v. 3, n. 1, p. 111-128, 2016.

KARRE, H. *et al.* Transition towards an industry 4.0 state of the lean lab at Graz University of Technology. **Procedia manufacturing**, Amsterdã, v. 9, p. 206–213, 2017.

KASPAR S.; SCHNEIDER M. Lean and industry 4.0 in the field of intra logistics: efficiency improvement by combination of the two approaches. **Productivity management**, Berlin, v.20, n. 5, p. 17-20, 2015.

KENNEDY, J. Lean six sigma: a case study in aerospace maintenance, repair, and overhaul. **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v. 29, n. 1, p. 30-44, 2012.

KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. **International journal of production research**, London, v. 55, n. 10, p. 2845–2856, 2017.

KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. **IFAC-papersonline**, Amsterdã, v. 28, n. 3, p. 1870–1875, 2015.

KOTHARI, C; GARG, G. **Research methodology: methods and techniques**. 3rd. ed. New Delhi: New Age International Publishers, 2014.

KOWANG, T. O. *et al.* Lean six sigma sustainability framework: a case study on an automotive company. **Asian journal of scientific research**, v. 9, Pakistan, n. 5, p. 279-283, 2016.

KUMAR, M. *et al.*, Implementing the lean sigma framework in an Indian SME: a case study. **Production planning and control**, London, v. 17, n. 4, p. 407–423, 2006.

KUMAR, P. *et al.* Integration between lean, six sigma and industry 4.0 technologies. **International journal of six sigma and competitive advantage**, Genebra, v. 13, n. 1-3, p. 19-37, 2021.

KUMAR, A.; SINGH, R. Concepts and technologies of industry 4.0: a bibliometric analysis. **International journal of research in science and technology**, Nova Deli, v. 14, n. 2, p. 123-138, 2021.

LANDE, M.; SHRIVASTAVA, R. L.; SETH, D. Critical success factors for lean six sigma in SMEs (small and medium enterprises). **TQM journal**, Leeds, v. 28, n. 4, p. 613–635, 2016.

LASI, H. *et al.* Industry 4.0. **Business and information systems engineering**, Berlin, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.

LAUREANI, A.; BRADY, M.; ANTONY, J. Applications of lean six sigma in an irish hospital. **Leadership in health services**, Bingley, v. 26, n. 4, p. 322-337, 2013.

LAUREANI, A.; ANTONY, J. Leadership characteristics for lean six sigma. **Total quality management and business excellence**, London, v.28, n.3, p. 405-426, 2017.

LAUX, C.; FRANZE, D. Six sigma higher education certification for work employability. In: INTERNATIONAL, EDUCATION AND DEVELOPMENT CONFERENCE, 4, p.242-249, 2010, Valencia. **Proceedings**[...]. Valencia: Ecatech, 2010. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-forimplementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-workinggroup/>. Acesso em: 2 Dec. 2023.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. ScienceDirect A Cyber-Physical Systems architecture for industry 4. 0-based manufacturing systems. **Manufacturing letters**, Southfield, v. 3, p. 18–23, 2015.

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

LERTWATTANAPONGCHAI, S.; SWIERCZEK, F. W. Assessing the change process of lean six sigma: a case analysis. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 5, n. 4, p. 366-384, 2014.

LEYH, C.; MARTIN, S.; SCHÄFFER, T. Analyzing industry 4.0 models with focus on lean production aspects. **lecture notes in business information processing**, Berlin, v. 311, p. 114–130, 2018.

LI, X. *et al.* A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. **Wireless network**, Berlin, v.23, n. 1, p. 23–41, 2017.

LIAO, Y. *et al.* Past, present and future of industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. **International journal of production research**, London, v. 55, n. 12, p. 3609–3629, 2017.

LIU, Y.; XU, X. Industry 4. 0 and cloud manufacturing: a comparative analysis. **Journal of manufacturing science and engineering**, New York, v. 139, n. March 2017, p. 1–8, 2019.

LU, Y. Journal of industrial information integration industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of industrial information integration**, v. 6, Amsterdã, p. 1–10, 2017.

LUGERT, A.; WINKLER, H. Von der wertstromanalyse zum wertstrommanagement. **ZWF zeitschrift für wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 112, n. 4, p. 261–265, 2017.

MALEYEFF, J.; ARNHEITER, E. A.; VENKATESWARAN, V. The continuing evolution of lean six sigma. **TQM Journal**, Leeds, v. 24, n. 6, p. 542–555, 2012.

MARTENS, J. Improved functions and high throughput. **Kunststoffe International**, Berlin, v. 106, n. 9, p. 55-57, 2016.

MASON, S. E.; NICOLAY, C. R.; DARZI, A. The use of lean and six sigma methodologies in surgery: a systematic review. **Surgeon**, Amsterdã, v. 13, n. 2, p. 91-100, 2015.

MCDERMOTT, O.; ANTONY, J.; DOUGLAS, J. Exploring the use of operational excellence methodologies in the era of COVID-19: perspectives from leading academics and practitioners. **TQM Journal**, Leeds, v. 33, n. 8, p. 1647–1665, 2021.

MEINDL, T.; BALLE, J. Planning, building *and* putting into operation a laboratory expansion in times of big data, lean management and industry 4.0. **Pharmazeutische industrie**, Berlin, v. 80, n. 1, p. 136–143, 2018.

MEZA, D.; JEONG, K. Y. Measuring efficiency of lean six sigma project implementation using data envelopment analysis at Nasa. **Journal of industrial engineering and management**, Novi Sad, v. 6, n. 4, p. 1017-1031, 2013.

METTERNICH, J. *et al.* Lean 4.0 zwischen widerspruch und vision. **ZWF zeitschrift fuer wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 112, n. 5, p. 346–348, 2017.

MOSTERMAN, P. J.; ZANDER, J. Industry 4.0 as a cyber-physical system study. **Software and systems modeling**, Berlin, v. 1, n. 1, 2015.

MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. Towards lean production in industry 4.0. **Procedia engineering**, Amsterdã, v. 182, n. 1, p. 466–473, 2017.

MÜLLER, M.; GOTHE, Y. Lean-Lab concepts in the context of industry 4.0. **Pharmazeutische industrie**, Berlin, v. 79, n. 8, p. 1126–1137, 2017.

MUSTAPHA, M. R.; ABU HASAN, F.; MUDA, M. S. Lean six sigma implementation: multiple case studies in a developing country. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 10, n. 1, p. 523–539, 2019.

NALLUSAMY, S.; CHAKRABORTY, P. S.; PUNNARAO, G. V. Reduction analysis of welding defects using lean six sigma and dmaic application – a case study. **International journal of mechanical engineering**, Greece, v. 10, n. 4, p. 13–20, 2023.

NÄSLUND, D. Lean, six sigma and lean sigma: fads or real process improvement methods? **Business process management journal**, Bingley, v. 14, n. 3, p. 269–287, 2008.

NETLAND, T. H. Critical success factors for implementing lean production: the effect of contingencies. **International journal of production research**, London, v. 54, n. 8, 2016.

OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. Computers in industry understanding the implications of digitization and automation in the context of industry 4.0: a triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in industry**, Amsterdã, v. 83, p. 121–139, 2016.

PAGLIOSA, M.; TORTORELLA, G.; FERREIRA, J. C. E. Industry 4.0 and lean manufacturing: a systematic literature review and future research directions. **Journal manufacturing technology management**, Bingley, vol. 32, no. 3, p. 543–569, 2021.

PALACÍ-LÓPEZ, D.; BORRÀS-FERRÍS, J.; ALBERTO, F. Multivariate six sigma: a case study in industry 4.0. **Processes**, Basel, v. 8 n. 9, 2020.

PAMFILIE, R.; PETCU, A.; DRAGHICI, M. The importance of leadership in driving a strategic lean six sigma management. In: THE INTERNATIONAL STRATEGIC MANAGEMENT CONFERENCE, 8, p.1-1650, 2012. **Procedia social and behavioral sciences**, Barcelona, v. 58, n. 1, p. 187-196, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812044540>. Acesso em: 12 Jan. 2023.

PAN, M. *et al.* Design technologies for eco-industrial parks: from unit operations to processes, plants and industrial networks. **Applied energy**, Amsterdã, v. 175, p. 305–323, 2016.

PATYAL, V. S.; MADDULETY, K. interrelationship between total quality management and six sigma, a review. **Global business review**, London, v.16, n. 2, p. 1025–1060, 2015

PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 49, 2016, Koloa. **Proceedings**[...] Maui: IEEE, 2016. p. 3928–3937. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7427673>. Acesso em: 10 Dec. 2023.

PEPPER, M.; SPEDDING, T. The Evolution of lean six sigma. **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v.27, n.2, p. 138-155, 2010.

PEREIRA, A. C.; ROMERO, F. A review of the meanings *and* the implications of the industry 4.0 concept. **Procedia Manufacturing**, Amsterdã, v. 13, p. 1206–1214, 2017.

POKORNI, B. *et al.* Produktionsassessmant 4.0 entwicklung eines reifegradmodells zur bewertung der lean management. **ZWF zeitschrift für wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 112, n. 12, p. 20–24, 2017.

POSADA, J.; TORO, C. Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and industrial internet. **IEEE computer graphics and applications**, California, v. 35, n. 1, p. 26–40, 2015.

POWELL, D. *et. al.* The concurrent application of lean production and erp: towards an Erp-based lean implementation process. **Computers in industry**, Amsterdã, v. 64, n. 3, p. 324–335, 2013.

PRAHARSI, Y. *et al.* The application of lean six sigma and supply chain resilience in maritime industry during the era of covid-19. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 12, n. 4, p. 800-834, 2021.

PSYCHOGIOS, A. G.; TSIRONIS, L. K. Towards an integrated framework for lean six sigma application: lessons from the airline industry. **Total quality management and business excellence**, London, v. 23, n. 3–4, p. 397–415, 2012.

PYZDEK, T.; KELLER, P. **Six sigma handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels**. 3 Ed. New York: McGraw-Hill, 2023.

QUASDORF, M.; BRACHT, C. Lean six sigma methodology: a comprehensive review. **Journal of Quality Improvement**, v.10, n. 2, p. 35-50, 2016. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/70163>. Acesso em: 12 Dec. 2023.

RICHTER, T. Ganzheitliche produktions systems. **ZWF zeitschrift für wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 111, n. 12, p. 771–774, 2016.

ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A complex view of industry 4.0, **Sage open**, Nova York, v. 6, n. 2, 2016. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2158244016>. Acesso em: 16 Oct. 2023.

RODGERS, B; ANTONY, J. Lean and six sigma practices in the public sector: a review. **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v. 36, n. 3, p. 437–455, 2019.

ROMERO, D. *et al.* Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In: INTERNATIONAL CONFERENCES ON COMPUTERS AND INDUSTRIAL ENGINEERING, 46, 2016, Tianjin. **Proceedings [...]**.Tianjin: Curran Associates, 2017.

ROSIN, F. *et al.* Impacts of industry 4.0 technologies on lean principles. **International journal of production research**, London, v. 58, n. 6, p. 1644-1661, 2020.

ROSSINI, M.; COSTA, F.; STAUDACHER, A. P.; TORTORELLA, G. Industry 4.0 and lean production: an empirical study. **IFAC-papersonline**, Amsterdã, v. 52, n. 13, p. 42-47, 2019.

RÖSSLER, M. P.; HASCHEMI, M. Smart factory assessment (SFA). **ZWF zeitschrift für wirtschaftlichen fabrikbetrieb**, Berlin, v. 112, n. 10, p. 699–703, 2017.

ROY, D.; MITTAG, P.; BAUMEISTER, M. Industrie 4.0 – impact of digitalization on the five lean principles. **Productivity management**, Berlin, v. 20, n. 2, p. 27-30, 2015.

RÜßMANN, M. *et al.* Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston consulting group**, Boston, v. 4, n. 1, p. 1-14, 2015. Disponível em: https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries. Acesso em: 18 Dec. 2023.

RUNFOLA, A. *et al.* The use of qualitative case studies in top business and management journals: a quantitative analysis of recent patterns. **European management journal**, Amsterdã, v. 35, n. 1, p. 116-127, 2017.

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**, Novi Sad, v.9, n.3, p. 811-833, 2016.

SANTOS NETO, S. T. D. **A capacitação dos green belts na metodologia lean six sigma: um mapeamento dos cursos de capacitação na região do vale do paraíba**. Orientador: Marília Marcolin Azevedo. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2017.

SCHLECHTENDAHL, J. *et al.* A. Making existing production systems industry 4.0-ready: holistic approach to the integration of existing production systems in industry 4.0 environments. **Production engineering**, Berlin, v. 9, n. 1, p. 143-148, 2014.

SCHUH, G. *et al.* Industrie 4.0 maturity index. managing the digital transformation of companies. **Acatech institute**, Munique, 2020. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/>. Acesso em: 3 nov. 2023.

SHAFIQ, S. I. *et al.* Virtual engineering object (veo): toward experience-based design and manufacturing for industry 4.0. **Cybernetics and systems**, Nova York, v. 46, n. 8, p. 611-629, 2015

SHOKRI, A.; WARING, T. S.; NABHANI, F. Investigating the readiness of people in manufacturing SMEs to embark on lean six sigma projects. **International journal of operations and production management**, Bingley, v. 36, n. 8, p. 850-878, 2016.

SIKORSKI, J. J.; HAUGHTON, J.; KRAFT, M. Blockchain technology in the chemical industry: machine-to-machine electricity market. **Applied energy**, Amsterdã, v. 195, p. 234-246, 2017.

SKALLI, D; CHARKAOUI, A; CHERRAFI, A. Progress and trends in industry 4.0 and lean six sigma integration. **Journal of operations and supply chain management**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 87-95, 2020.

SNEE, R. D. Lean Six Sigma – getting better all the time. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 1, n. 1, p. 9-20, 2010.

SOMMER, L. industrial revolution - industry 4.0: are german manufacturing smes the first victims of this revolution? **Journal of industrial engineering and management**, Barcelona, v. 8, n. 5, p. 1512-1532, 2015.

SONY, M. Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. **Production and manufacturing research**, Abingdon, v. 6, n. 1, p. 416-432, 2018.

SORDAN, J. E. *et al.* Contact points between lean six sigma and industry 4.0: a systematic review and conceptual framework. **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v.1, n.1, 2021.

STRANGE, R.; ZUCHELLA, A. Industry 4.0, global value chains and international business. **Multinational business review**, Bingley, v. 25, n. 3, p. 174-184, 2017.

SUNDER, M.; VIJAYA, S. M.; ANTONY, J. A conceptual lean six sigma framework for quality excellence in higher education institutions. **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v. 35, n. 4, p. 857-874, 2018.

SVENSSON, G.; PADIN, C. Teleological approaches from complexity sciences in services: framework, illustration and proposition. **International journal of quality and service sciences**, Leeds, v. 4, n. 3, p. 224–237, 2012.

TAO, F. *et al.* A manufacturing service supply–demand matching simulator under cloud environment. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, Amsterdã, v. 45, n. 1, p. 34–46, 2017.

TAO, F.; ZHANG, M. Digital Twin Shopfloor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. **IEEE Access**, Piscataway, v. 5, n. 1, p. 20418–20427, 2017.

THEORIN, A. *et al.* An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. **International journal of production research**, London, v. 7543, n. 7, p. 1–15, 2016.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. 8. ed. São Paulo: Cortez, 1998.

THOBEN, K.; WIESNER, S.; WUEST, T. Industrie 4.0 and smart manufacturing – a review of research issues and application examples. **International journal of automation**, Tokyo, v. 11, n. 1, 2017.

TIMANS, W. *et al.*, Implementation of lean six sigma in small and medium-sized 216 manufacturing enterprises in the Netherlands. **Journal of the operational research society**, Abingdon, v. 63, n. 3, p. 339–353, 2012.

TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. **International journal of production research**, London, v. 7543, p. 1–13, 2017.

TORTORELLA, G.; MIORANDO, R.; MAC CAWLEY, A. F. The moderating effect of Industry 4.0 on the relationship between lean supply chain management and performance improvement. **Supply chain management**, Bingley, v. 24, n. 2, p. 301–314, 2019.

TORTORELLA, G. L.; GIGLIO, R.; VAN 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 and production management**, Bingley, v. 39, n. 1, p. 860-886, 2019.

TSIRONIS, L. K.; PSYCHOGIOS, A. Road towards lean six sigma in service industry: a multi-factor integrated framework. **Business process management journal**, Bingley, v. 22, n. 4, p. 812-834, 2016.

ULUSKAN, M. Analysis of lean six sigma tools from a multidimensional perspective. **Total quality management and business excellence**, London, v. 30, n. 9-10, p. 1167-1188, 2019.

VARELA, L. *et al.* Evaluation of the relation between lean manufacturing, industry 4.0, and sustainability. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 5, p. 1–19, 2019.

VIJAYA, S. M. Synergies of lean six sigma. **Journal of operations management**, New Jersey, v. 12, n.1, 2013.

VILLALBA-DIEZ, J. *et al.* Characterization of industry 4.0 lean management problem-solving behavioral patterns using EEG sensors and deep learning. **Sensors**, Basel, v. 19, n. 13, 2019.

VINODH, S.; GAUTHAM, S. G.; RAMIYA R. A. Implementing lean sigma framework in an indian automotive valves manufacturing organization: a case study. **Production planning and control**, London, v. 22, n. 7, p. 708-722, 2011.

VOGEL-HEUSER, B.; HESS, D. Guest editorial industry 4.0-prerequisites and visions. **IEEE transactions on automation science and engineering**, Nova York, v. 13, n. 2, p. 411–413, 2016.

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

WANG, S. *et al.* C. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. **International journal of distributed sensor network**, California, v. 2016, 2016a.

WANG, S. *et al.* Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big database feedback and coordination. **Computers networks**, Amsterdã, v. 101, n. 1, p. 158-168, 2016b.

WOLLSCHLAEGER, M.; SAUTER, T.; JASPERNEITE, J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. **IEEE industrial electronics magazine**, Nova York, v. 11, n. 1, p. 17-27, 2017.

XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4. 0: state of the art *and* future trends. **International journal of production research**, London, v. 7543, n. 1, 2018.

YADAV, N.; SHANKAR, R.; SINGH, S. P. Hierarchy of critical success factors for lean six sigma in quality 4.0. **International journal of global business and competitiveness**, Berlin, v. 16, n. 1, p. 1-14, 2021.

YADAV, G.; DESAI, T. N. Lean six sigma: a categorized review of the literature. **International journal of lean six sigma**, Bingley, v. 7, n. 1, p. 2–24, 2016

YADAV, G.; DESAI, T. N. A fuzzy AHP approach to prioritize the barriers of integrated lean six sigma. **International journal of quality and reliability management**, Bingley, v. 34, n. 8, p. 1167–1185, 2017

YIN, R. K. **Case study: research design and methods**. 6. ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publishing, 2018.

ZAWADZKI, P.; ŻYWICKI, K. Smart product design and production control for effective mass customization in the industry 4.0 concept. **Management and production engineering Review**, Poland, v. 7, n. 3, p. 105–112, 2016.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. **Engineering**, Amsterdã, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017.

APÊNDICES

Apêndice A – Protocolo de Coleta de Dados

Guia de coleta de dados -PROTOCOLO PARA A COLETA DE DADOS DA PESQUISA						
QUESTÕES		INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS				
		Entrevistas			Observação	Análise Documental
		Alta Administração	Nível Gerencial	Nível Operacional		
1 Dados Gerais	1.1. Origem da empresa	X				X
	1.2. Fundação	X				X
	1.3. Início da (s) atividades no Brasil (Multinacional)	X				X
	1.4. Porte da Empresa (nº de funcionários)	X			X	X
	1.5. Segmento do setor industrial	X			X	
2 I4	2.1. Padronização de Processos	X	X	X	X	X
	2.2. Virtualização de Processos			X	X	
	2.3. Descentralização de Processos		X	X	X	
	2.4. Flexibilidade nos Processos		X	X	X	X
	2.5. Controle de Processos		X	X	X	
	2.6. Otimização de Process		X	X	X	
	2.7. Integração dos Dispositivos, Sistemas e Processos		X	X	X	
	2.8. Comunicação Segura entre os Sistemas		X	X	X	
	2.9. Mobilidade dos Usuários		X	X	X	
	2.10. Colaboração entre Dispositivos, Sistemas e Processos		X	X	X	
	2.11. Gestão de Sistemas Complexos	X	X		X	
	2.12. Disponibilização de Dados em tempo real		X	X	X	
	2.13. Transparência de Dados e Operações		X	X	X	
	2.14. Sistemas dotados de Cognição		X	X	X	
	2.15. Melhoria Contínua dos Processos		X	X	X	
	2.16. Análise de Dados e Cenários		X	X	X	
	2.17. Simulação de Processos		X	X	X	
	2.18. Autoajuste de Dispositivos, Sistemas e Processos		X	X	X	
3 LSS	2.10.Planejar a Longo Prazo	X	X			X
	2.11.Gerenciar projetos	X	X		X	X
	2.12.Gerenciar profissionais	X	X			X
	2.13.Gerenciar informações	X	X	X	X	X
	2.14.Gerenciar fornecedores	X	X	X	X	X
	2.15.Gerenciar recursos	X	X		X	X
	2.16.Melhorar processos e resultados		X	X	X	X
4 LSS e I4	4.1. I4 favorece a padronização proposta pelo LSS	X	X		X	X
	4.2. I4 favorece a disponibilização de dados em tempo real	X	X		X	X
	4.3. I4 reduz os tempos de execução dos projetos LSS	X	X		X	X
	4.4 I4 melhora o nível dos controles de processo	X	X		X	X
	4.4 LSS define os processos prioritários para a digitalização	X	X		X	X
	4.5. LSS ajuda a comprovar os ganhos com a digitalização	X	X		X	X
	4.6. LSS acelera o retorno s/ investimentos em digitalização	X	X		X	X

Fonte: Produção do próprio autor.

Apêndice B – 30 artigos mais citados sobre *Lean* ou LSS combinado com I4 no período de Jan/2011 a Ago/2023

Autores	Título	Ano	Volume	Citações
Sanders A.; Elangeswaran C.; Wulfsberg J.	Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing	2016	9	582
Buer S.-V.; Strandhagen J.O.; Chan F.T.S.	The link between industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda	2018	56	498
Tortorella G.L.; Fettermann D.	Implementation of industry 4.0 and lean production in brazilian manufacturing companies	2018	56	427
Kamble S.; Gunasekaran A.; Dhone N.C.	Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies	2020	58	314
Ghobakhloo M.; Fathi M.	Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing	2020	31	212
Tortorella G.L.; Giglio R.; van Dun D.H.	Industry 4.0 adoption as a moderator of the impact of lean production practices on operational performance improvement	2019	39	207
Sony M.	Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions	2018	6	202
Rosin F.; Forget P.; Lamouri S.; Pellerin R.	Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles	2020	58	195
Núñez-Merino M.; Maqueira-Marín J.M.; Moyano-Fuentes J.; N	Information and digital technologies of Industry 4.0 and Lean supply chain management: a systematic literature review	2020	58	166
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	2019	102	157
Dombrowski U.; Richter T.; Krenkel P.	Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: A Use Cases Analysis	2017	11	141
Varela L.; Araújo A.; Ávila P.; Castro H.; Putnik G.	Evaluation of the relation between lean manufacturing, industry 4.0, and sustainability	2019	11	130
Pagliosa M.; Tortorella G.; Ferreira J.C.E.	Industry 4.0 and Lean Manufacturing: A systematic literature review and future research directions	2021	32	114
Shahin M.; Chen F.F.; Bouzary H.; Krishnaier K.	Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises	2020	107	111
Chiarini A.; Kumar M.	Lean Six Sigma and Industry 4.0 integration for Operational Excellence: evidence from Italian manufacturing companies	2021	32	103
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	2021	59	101
Arcidiacono G.; Pieroni A.	The revolution Lean Six Sigma 4.0	2018	8	75
Ciliberto C.; Szopik-Depczyńska K.; Tarczyńska-Łuniewska M.; R	Enabling the Circular Economy transition: a sustainable lean manufacturing recipe for Industry 4.0	2021	30	72
De Giovanni P.; Cariola A.	Process innovation through industry 4.0 technologies, lean practices and green supply chains	2021	90	69
Bittencourt V.L.; Alves A.C.; Leão C.P.	Industry 4.0 triggered by Lean Thinking: insights from a systematic literature review	2021	59	68
Valamede L.S.; Akkari A.C.S.	Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies	2020	5	65
Pereira A.C.; Dinis-Carvalho J.; Alves A.C.; Arezes P.	How Industry 4.0 can enhance lean practices	2019	47	54
Leong W.D.; Teng S.Y.; How B.S.; Ngan S.L.; Rahman A.A.; Tan C	Enhancing the adaptability: Lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0	2020	273	53
Tortorella G.; Sawhney R.; Jurburg D.; de Paula I.C.; Tlapa D.; Tl	Towards the proposition of a Lean Automation framework: Integrating Industry 4.0 into Lean Production	2021	32	51
Dahmani N.; Benhida K.; Belhadi A.; Kamble S.; Elfezazi S.; Jauh	Smart circular product design strategies towards eco-effective production systems: A lean eco-design industry 4.0 framework	2021	320	50
Ramadan M.; Salah B.; Othman M.; Ayubali A.A.	Industry 4.0-based real-time scheduling and dispatching in lean manufacturing systems	2020	12	47
Tortorella G.L.; Rossini M.; Costa F.; Portioli Staudacher A.; Saw	A comparison on Industry 4.0 and Lean Production between manufacturers from emerging and developed economies	2021	32	44
Saxby R.; Cano-Kourouklis M.; Viza E.	An initial assessment of Lean Management methods for Industry 4.0	2020	32	40
Yadav N.; Shankar R.; Singh S.P.	Critical success factors for lean six sigma in quality 4.0	2021	13	40
Miqueo A.; Torralba M.; Yagüe-Fabra J.A.	Lean manual assembly 4.0: A systematic review	2020	10	37

Fonte: Produção do próprio autor.

Apêndice C – 30 artigos mais citados sobre LSS no período de Jan/2011 a Ago/2023

Autores	Título	Ano	Citações
Albliwi S.; Antony J.; Lim S.A.H.; van der Wiele T.	Critical failure factors of lean Six Sigma: A systematic literature review	2014	378
Cherrafi A.; Elfezazi S.; Chiarini A.; Mokhlis A.; Benhida K.	The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model	2016	345
Cima R.R.; Brown M.J.; Hebl J.R.; Moore R.; Rogers J.C.; Kollengoda S.	Use of lean and six sigma methodology to improve operating room efficiency in a high-volume tertiary-care academic medical center	2011	339
Cherrafi A.; Elfezazi S.; Govindan K.; Garza-Reyes J.A.; Benhida K.	A framework for the integration of Green and Lean Six Sigma for superior sustainability performance	2017	241
Albliwi S.A.; Antony J.; Lim S.A.H.	A systematic review of Lean Six Sigma for the manufacturing industry	2015	239
Antony J.; Krishan N.; Cullen D.; Kumar M.	Lean Six Sigma for higher education institutions (HEIs): Challenges, barriers, success factors, tools/techniques	2012	208
Kumar S.; Luthra S.; Govindan K.; Kumar N.; Haleem A.	Barriers in green lean six sigma product development process: An ISM approach	2016	206
Garza-Reyes J.A.	Green lean and the need for Six Sigma	2015	201
Drohomeretski E.; Gouveia Da Costa S.E.; Pinheiro De Lima E.; Garza-Reyes J.A.	Lean, six sigma and lean six sigma: An analysis based on operations strategy	2014	191
Hilton R.J.; Sohal A.	A conceptual model for the successful deployment of Lean Six Sigma	2012	188
Mason S.E.; Nicolay C.R.; Darzi A.	The use of Lean and Six Sigma methodologies in surgery: A systematic review	2015	187
Antony J.; Snee R.; Hoerl R.	Lean Six Sigma: yesterday, today and tomorrow	2017	182
Timans W.; Antony J.; Ahaus K.; Van Solingen R.	Implementation of Lean Six Sigma in small- and medium-sized manufacturing enterprises in the Netherlands	2012	175
Antony J.	Six Sigma vs Lean: Some perspectives from leading academics and practitioners	2011	174
Antony J.	Readiness factors for the Lean Six Sigma journey in the higher education sector	2014	173
Antony J.; Manville G.; Greatbanks R.; Krishnasamy R.; Parker D.W.	Critical success factors for Lean Six Sigma programmes: A view from middle management	2012	169
Banawi A.; Bilec M.M.	A framework to improve construction processes: Integrating lean, green and six sigma	2014	162
Belhadi A.; Kamble S.S.; Zikic K.; Cherrafi A.; Touriki F.E.	The integrated effect of Big Data Analytics, Lean Six Sigma and Green Manufacturing on the environmental performance of manufacturing companies: The case of the automotive industry	2020	157
Chugani N.; Kumar V.; Garza-Reyes J.A.; Rocha-Lona L.; Upadhyay N.	Investigating the green impact of Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma: A systematic literature review	2017	150
Yadav G.; Desai T.N.	Lean Six Sigma: a categorized review of the literature	2016	147
Gupta S.; Modgil S.; Gunasekaran A.	Big data in lean six sigma: a review and further research directions	2020	146
Singh M.; Rath R.	A structured review of Lean Six Sigma in various industrial sectors	2019	143
Habidin N.F.; Yusof S.M.	Critical success factors of lean six sigma for the Malaysian automotive industry	2013	138
Kaswan M.S.; Rath R.	Analysis and modeling the enablers of Green Lean Six Sigma implementation using Interpretive Structural Modeling	2019	135
Raja Sreedharan V.; Raju R.	A systematic literature review of Lean Six Sigma in different industries	2016	135
Bhat S.; Gijo E.V.; Jnanesh N.A.	Application of Lean Six Sigma methodology in the registration process of a hospital	2014	135
Lande M.; Shrivastava R.L.; Seth D.	Critical success factors for Lean Six Sigma in SMEs (small and medium enterprises)	2016	130
Ben Ruben R.; Vinodh S.; Asokan P.	Implementation of Lean Six Sigma framework with environmental considerations in an Indian automotive component manufacturing firm: a case study	2017	121
Sunder V.M.; Ganesh L.S.; Marathe R.R.	A morphological analysis of research literature on Lean Six Sigma for services	2018	119
Alhuraish I.; Robledo C.; Kobi A.	A comparative exploration of lean manufacturing and six sigma in terms of their critical success factors	2017	111

Fonte: Produção do próprio autor.

Apêndice D – 30 artigos mais citados sobre I4 no período de Jan/2011 a Ago/2023.

Autores	Título	Ano	Volume	Citações
Lee J.; Bagheri B.; Kao H.-A.	A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing	2015	3	3158
Lasi H.; Fettke P.; Kemper H.-G.; Feld T.; Hoffmann M.	Industry 4.0	2014	6	2745
Lu Y.	Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues	2017	6	1859
Xu L.D.; Xu E.L.; Li L.	Industry 4.0: State of the art and future trends	2018	56	1768
Zhong R.Y.; Xu X.; Klotz E.; Newman S.T.	Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review	2017	3	1645
Frank A.G.; Dalenogare L.S.; Ayala N.F.	Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing	2019	210	1333
Liao Y.; Deschamps F.; Loures E.F.R.; Ramos L.F.P.	Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review	2017	55	1252
Wollschlaeger M.; Sauter T.; Jasperneite J.	The future of industrial communication: Automation networks in the Industry 4.0 era	2017	11	1187
Dalenogare L.S.; Benitez G.B.; Ayala N.F.; Frank A.G.	The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial production	2018	204	1076
Hofmann E.; Rüsç M.	Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on manufacturing	2017	89	1074
Wang S.; Wan J.; Zhang D.; Li D.; Zhang C.	Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system	2016	101	987
Wang S.; Wan J.; Li D.; Zhang C.	Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook	2016	2016	980
Oztemel E.; Gursev S.	Literature review of Industry 4.0 and related technologies	2020	31	976
Kang H.S.; Lee J.Y.; Choi S.; Kim H.; Park J.H.; Son J.Y.; Kim B.H.; No	Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions	2016	3	931
Qi Q.; Tao F.	Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industrial Engineering	2018	6	893
Oesterreich T.D.; Teuteberg F.	Understanding the implications of digitisation and automation in the manufacturing industry	2016	83	855
Ivanov D.; Dolgui A.; Sokolov B.	The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and on bullwhip	2019	57	854
Tao F.; Zhang M.	Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing	2017	5	798
Thoben K.-D.; Wiesner S.A.; Wuest T.	"Industrie 4.0" and smart manufacturing-a review of research issues and trends	2017	11	760
Ghobakhloo M.	The future of manufacturing industry: a strategic roadmap towards Industry 4.0	2018	29	748
Kamble S.S.; Gunasekaran A.; Gawankar S.A.	Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review	2018	117	732
Chen B.; Wan J.; Shu L.; Li P.; Mukherjee M.; Yin B.	Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Cases, and Future Trends	2017	6	722
Drath R.; Horch A.	Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]	2014	8	717
Ghobakhloo M.	Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability	2020	252	707
Lu Y.; Liu C.; Wang K.I.-K.; Huang H.; Xu X.	Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, application	2020	61	682
Alcácer V.; Cruz-Machado V.	Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Smart Manufacturing	2019	22	678
Moeuf A.; Pellerin R.; Lamouri S.; Tamayo-Giraldo S.; Barbaray R.	The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0	2018	56	668
Müller J.M.; Buliga O.; Voigt K.-I.	Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovation	2018	132	647
Roblek V.; Meško M.; Krapež A.	A Complex View of Industry 4.0	2016	6	645
Lopes de Sousa Jabbour A.B.; Jabbour C.J.C.; Godinho Filho M.; Ro	Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda	2018	270	617

Fonte: Produção do próprio autor.

Apêndice E – 30 artigos mais citados sobre LSS no período de 2010 a 2020

#	Autores	Título	Ano	Citações
1	Cima R.R., Brown M.J., Hebl J.R., Moore R., Rogers J.C., Kollengode A., Amstutz G.J., Weisbrod C.A., Narr B.J., Deschamps C.	Use of lean and six sigma methodology to improve operating room efficiency in a high-volume tertiary-care academic medical center	2011	252
2	Albliwi S., Antony J., Lim S.A.H., van der Wiele T.	Critical failure factors of lean Six Sigma: A systematic literature review	2014	215
3	Cherrafi A., Elfezazi S., Chiarini A., Mokhlis A., Benhida K.	The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model	2016	189
4	Antony J., Krishan N., Cullen D., Kumar M.	Lean Six Sigma for higher education institutions (HEIs): Challenges, barriers, success factors, tools/techniques	2012	142
5	Drohomeretski E., Gouveia Da Costa S.E., Pinheiro De Lima E., Garbuio P.A.D.R.	Lean, six sigma and lean six sigma: An analysis based on operations strategy	2014	140
6	Antony J.	Six Sigma vs Lean: Some perspectives from leading academics and practitioners	2011	138
7	Antony J., Manville G., Greatbanks R., Krishnasamy R., Parker D.W.	Critical success factors for Lean Six Sigma programmes: A view from middle management	2012	134
8	Hilton R.J., Sohal A.	A conceptual model for the successful deployment of Lean Six Sigma	2012	131
9	Albliwi S.A., Antony J., Lim S.A.H.	A systematic review of Lean Six Sigma for the manufacturing industry	2015	130
10	Timans W., Antony J., Ahaus K., Van Solingen R.	Implementation of Lean Six Sigma in small- and medium-sized manufacturing enterprises in the Netherlands	2012	126
11	Mason S.E., Nicolay C.R., Darzi A.	The use of Lean and Six Sigma methodologies in surgery: A systematic review	2015	123
12	Cherrafi A., Elfezazi S., Govindan K., Garza-Reyes J.A., Benhida K., Mokhlis A.	A framework for the integration of Green and Lean Six Sigma for superior sustainability performance	2017	119
13	Kumar S., Luthra S., Govindan K., Kumar N., Haleem A.	Barriers in green lean six sigma product development process: An ISM approach	2016	118
14	Antony J.	Readiness factors for the Lean Six Sigma journey in the higher education sector	2014	115
15	Garza-Reyes J.A.	Green lean and the need for Six Sigma	2015	107
16	Habidin N.F., Yusof S.M.	Critical success factors of lean six sigma for the malaysian automotive industry	2013	96
17	Bhat S., Gijo E.V., Jnanesh N.A.	Application of Lean Six Sigma methodology in the registration process of a hospital	2014	90
18	Banawi A., Bilec M.M.	A framework to improve construction processes: Integrating lean, green and six sigma	2014	89
19	Chugani N., Kumar V., Garza-Reyes J.A., Rocha-Lona L., Upadhyay A.	Investigating the green impact of Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma: A systematic literature review	2017	79
20	Yadav G., Desai T.N.	Lean Six Sigma: a categorized review of the literature	2016	79
21	Psychogios A.G., Atanasovski J., Tsironis L.K.	Lean Six Sigma in a service context: A multi-factor application approach in the telecommunications industry	2012	78
22	Antony J., Snee R., Hoerl R.	Lean Six Sigma: yesterday, today and tomorrow	2017	76
23	Lande M., Shrivastava R.L., Seth D.	Critical success factors for Lean Six Sigma in SMEs (small and medium enterprises)	2016	71
24	Cheng C.-Y., Chang P.-Y.	Implementation of the Lean Six Sigma framework in non-profit organisations: A case study	2012	67
25	Corbett L.M.	Lean Six Sigma: The contribution to business excellence	2011	66
26	Svensson C., Antony J., Ba-Essa M., Bakhsh M., Albliwi S.	A Lean Six Sigma program in higher education	2015	64
27	Chiarini A.	Risk management and cost reduction of cancer drugs using Lean Six Sigma tools	2012	64
28	Laureani A., Brady M., Antony J.	Applications of Lean Six Sigma in an Irish hospital	2013	62
29	Chiarini A.	Japanese total quality control, TQM, deming's system of profound knowledge, BPR, lean and six sigma: Comparison and discussion	2011	62
30	Naslund D.	Lean and six sigma – critical success factors revisited	2013	61

Fonte: Produção do próprio autor.

Apêndice F – 30 artigos mais citados sobre I4 no período de 2010 a 2020

#	Autores	Titulos	Ano	Periódico	Citações
1	Lee J., Bagheri B., Kao H.-A.	A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems	2015	Manufacturing Letters	2034
2	Lasi H., Fettke P., Kemper H.-G., Feld T., Hoffmann M.	Industry 4.0	2014	Business and Information Systems Engineering	1392
3	Lu Y.	Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues	2017	Journal of Industrial Information Integration	949
4	Zhong R.Y., Xu X., Klotz E., Newman S.T.	Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review	2017	Engineering	783
5	Xu L.D., Xu E.L., Li L.	Industry 4.0: State of the art and future trends	2018	International Journal of Production Research	710
6	Wollschlaeger M., Sauter T., Jasperneite J.	The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0	2017	IEEE Industrial Electronics Magazine	690
7	Liao Y., Deschamps F., Loures E.F.R., Ramos L.F.P.	Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal	2017	International Journal of Production Research	631
8	Wang S., Wan J., Zhang D., Li D., Zhang C.	Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination	2016	Computer Networks	603
9	Wang S., Wan J., Li D., Zhang C.	Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook	2016	International Journal of Distributed Sensor Networks	575
10	Kang H.S., Lee J.Y., Choi S., Kim H., Park J.H., Son J.Y., Kim B.H., Noh S.D.	Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions	2016	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology	537
11	Hofmann E., Rutsch M.	Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics	2017	Computers in Industry	522
12	Drath R., Horch A.	Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]	2014	IEEE Industrial Electronics Magazine	503
13	Oesterreich T.D., Teuteberg F.	Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry	2016	Computers in Industry	382
14	Wan J., Tang S., Shu Z., Li D., Wang S., Imran M., Vasilakos A.V.	Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0	2016	IEEE Sensors Journal	378
15	Thoben K.-D., Wiesner S.A., Wuest T.	"Industrie 4.0" and smart manufacturing-a review of research issues and application examples	2017	International Journal of Automation Technology	374
16	Roblek V., Meško M., Krapež A.	A Complex View of Industry 4.0	2016	SAGE Open	359
17	Qi Q., Tao F.	Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison	2018	IEEE Access	345
18	Frank A.G., Dalenogare L.S., Ayala N.F.	Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies	2019	International Journal of Production Economics	334
19	Posada J., Toro C., Barandiaran I., Oyarzun D., Stricker D., De Amicis R., Pinto E.B., Eisert P., Dollner J., Vallarino I., Jr.	Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet	2015	IEEE Computer Graphics and Applications	326
20	Chen B., Wan J., Shu L., Li P., Mukherjee M., Yin B.	Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges	2017	IEEE Access	323
21	Tao F., Zhang M.	Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing	2017	IEEE Access	323
22	Moelf A., Pellerin R., Lamouri S., Tamayo-Giraldo S., Barbaray R.	The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0	2018	International Journal of Production Research	285
23	Dalenogare L.S., Benitez G.B., Ayala N.F., Frank A.G.	The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance	2018	International Journal of Production Economics	282
24	Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B.	The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics	2019	International Journal of Production Research	272
25	Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B., Werner F., Ivanova M.	A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0	2016	International Journal of Production Research	270
26	Sanders A., Elangeswaran C., Wulfsberg J.	Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing	2016	Journal of Industrial Engineering and Management	266
27	Ghobakhloo M.	The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0	2018	Journal of Manufacturing Technology Management	261
28	Kamble S.S., Gunasekaran A., Gawankar S.A.	Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives	2018	Process Safety and Environmental Protection	257
29	Li X., Li D., Wan J., Vasilakos A.V., Lai C.-F., Wang S.	A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0	2017	Wireless Networks	257
30	Müller J.M., Buliga O., Voigt K.-I.	Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0	2018	Technological Forecasting and Social Change	252

Fonte: Produção do próprio autor.

Apêndice G – 39 artigos sobre *Lean* e *I4* ou *Lean Six Sigma* e *I4* no período de 2010 a 2020

#	Autores	Título	Ano	Periódicos	Citações
1	Sanders A.; Elangeswaran C.; Wulfsberg J.	Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing	2016	Journal of Industrial Engineering and Management	588
2	Buer S.-V.; Strandhagen J.O.; Chan F.T.S.	The link between industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda	2018	International Journal of Production Research	503
3	Tortorella G.L.; Fettermann D.	Implementation of industry 4.0 and lean production in brazilian manufacturing companies	2018	International Journal of Production Research	431
4	Kamble S.; Gunasekaran A.; Dhone N.C.	Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies	2020	International Journal of Production Research	318
5	Ghobakhloo M.; Fathi M.	Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing	2020	Journal of Manufacturing Technology Management	216
6	Tortorella G.L.; Giglio R.; van Dun D.H.	Industry 4.0 adoption as a moderator of the impact of lean production practices on operational performance improvement	2019	International Journal of Operations and Production Management	208
7	Sony M.	Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions	2018	Production and Manufacturing Research	205
8	Rosin F.; Forget P.; Lamouri S.; Pellerin R.	Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles	2020	International Journal of Production Research	199
9	Núñez-Merino M.; Maqueira-Marin J.M.; Moyano-Fu	Information and digital technologies of Industry 4.0 and Lean supply chain management: a systematic literature review	2020	International Journal of Production Research	170
10	Rossini M.; Costa F.; Tortorella G.L.; Portioli-Staudach	The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers	2019	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	157
11	Dombrowski U.; Richter T.; Krenkel P.	Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: A Use Cases Analysis	2017	Procedia Manufacturing	143
12	Varela L.; Araújo A.; Ávila P.; Castro H.; Putnik G.	Evaluation of the relation between lean manufacturing, industry 4.0, and sustainability	2019	Sustainability (Switzerland)	131
13	Shahin M.; Chen F.F.; Bouzary H.; Krishnaiyer K.	Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises	2020	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	111
14	Arcidiacono G.; Pieroni A.	The revolution Lean Six Sigma 4.0	2018	International Journal on Advanced Science, Engineering and Inf	77
15	Valamede L.S.; Akkari A.C.S.	Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies	2020	International Journal of Mathematical, Engineering and Manage	67
16	Leong W.D.; Teng S.Y.; How B.S.; Ngan S.L.; Rahman	Enhancing the adaptability: Lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0	2020	Journal of Cleaner Production	54
17	Pereira A.C.; Dinis-Carvalho J.; Alves A.C.; Arezes P.	How Industry 4.0 can enhance lean practices	2019	FME Transactions	54
18	Ramadan M.; Salah B.; Othman M.; Ayubali A.A.	Industry 4.0-based real-time scheduling and dispatching in lean manufacturing systems	2020	Sustainability (Switzerland)	47
19	Saxby R.; Cano-Kouroukhis M.; Viza E.	An initial assessment of Lean Management methods for Industry 4.0	2020	TQM Journal	40
20	Miqueo A.; Torralba M.; Yagüe-Fabra J.A.	Lean manual assembly 4.0: A systematic review	2020	Applied Sciences (Switzerland)	39
21	Tortorella G.; Miorando R.; Mac Cawley A.F.	The moderating effect of Industry 4.0 on the relationship between lean supply chain management and performance improvement	2019	Supply Chain Management	34
22	Sony M.	Design of cyber physical system architecture for industry 4.0 through lean six sigma: conceptual foundations and research issues	2020	Production and Manufacturing Research	32
23	Villalba-Diez J.; Zheng X.; Schmidt D.; Molina M.	Characterization of industry 4.0 lean management problem-solving behavioral patterns using EEG sensors and deep learning	2019	Sensors (Switzerland)	29
24	Deuse J.; Dombrowski U.; Nöhring F.; Mazarov J.; Di	Systematic combination of Lean Management with digitalization to improve production systems on the example of Jidoka 4.0	2020	International Journal of Engineering Business Management	27
25	Schmidt D.; Diez J.V.; Ordieres-Meré J.; Gevers R.; Sc	Industry 4.0 lean shopfloor management characterization using EEG sensors and deep learning	2020	Sensors (Switzerland)	24
26	Lekan A.; Clinton A.; Fayomi O.S.I.; James O.	Lean thinking and industrial 4.0 approach to achieving construction 4.0 for industrialization and technological development	2020	Buildings	23
27	Saabye H.; Kristensen T.B.; Wæhrens B.V.	Real-time data utilization barriers to improving production performance: An in-depth case study linking lean management and industry 4.0 from a	2020	Sustainability (Switzerland)	23
28	Villalba-Diez J.; Zheng X.	Quantum strategic organizational design: Alignment in industry 4.0 complex-networked cyber-physical lean management systems	2020	Sensors (Switzerland)	19
29	Fortuny-Santos J.; López P.R.-D.-A.; Luján-Blanco I.	Assessing the synergies between lean manufacturing and Industry 4.0	2020	Dirección y Organización	15
30	Villalba-Diez J.; Molina M.; Ordieres-Meré J.; Sun S.	Geometric deep lean learning: Deep learning in industry 4.0 cyber-physical complex networks	2020	Sensors (Switzerland)	15
31	Müller J.M.; Birkel H.S.	Contributions of Industry 4.0 to lean management within the supply chain operations reference model	2020	International Journal of Integrated Supply Management	11
32	Pamornmast C.; Sriyakul T.; Jemsittiparsert K.	Can lean manufacturing and 4.0 industry enhance the financial performance of pharmaceutical industries of Thailand? Mediating role of waste redu	2019	Systematic Reviews in Pharmacy	9
33	Hotravaisaya C.; Pakvichai V.; Sriyakul T.	Lean production determinants and performance consequences of implementation of Industry 4.0 in Thailand: Evidence from manufacturing sector	2019	International Journal of Supply Chain Management	7
34	Enke J.; Meister M.; Metternich J.; Genne M.; Brosch	The journey to Lean Quality 4.0 - Development of quality instruments of holistic production systems through Industrie 4.0; [Der Weg zur Lean C	2017	ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb	7
35	Tiep N.C.; Oanh T.T.K.; Thuan T.D.; Tien D.V.; Ha T	Industry 4.0, lean management and organizational support: A case of supply chain operations; [Przemysł 4.0, lean management i wsparcie organiz	2020	Polish Journal of Management Studies	6
36	Dănuț-Sorin I.R.; Opran C.G.; Lamanna G.	Lean Manufacturing 4.0 of Polymeric Injection Molding Products	2020	Macromolecular Symposia	6
37	Quasdorff O.; Bracht U.	The Lean Factory - Basis for the success of digital factory and Industrial 4.0; [Die Lean Factory: Basis für den Erfolg von Digitaler Fabrik und Ind	2016	ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb	4
38	Meindl T.; Balles J.	Planning, building and putting into operation a laboratory expansion in times of big data, lean management and Industry 4.0; [Planung, Bau und Inf	2018	Pharmazeutische Industrie	2
39	Müller M.; Gothe Y.	Lean-Lab concepts in the context of industry 4.0; [Lean-Lab-Konzepte im Kontext von Industrie 4.0]	2017	Pharmazeutische Industrie	0

Fonte: Produção do próprio autor.