



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MARCOS MALINVERNI PAGLIOSA

**MÉTODO PARA PRIORIZAR A IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA  
4.0 E MANUFATURA ENXUTA EM EMPRESAS DE MANUFATURA**

FLORIANÓPOLIS  
2019

Marcos Malinverni Pagliosa

**MÉTODO PARA PRIORIZAR A IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 E  
MANUFATURA ENXUTA EM EMPRESAS DE MANUFATURA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Luz Tortorella  
Coorientador Prof. João Carlos Espíndola Ferreira  
(PhD)

Florianópolis

2019

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

Pagliosa, Marcos Malinverni

MÉTODO PARA PRIORIZAR A IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 E  
MANUFATURA ENXUTA EM EMPRESAS DE MANUFATURA / Marcos  
Malinverni Pagliosa ; orientador, Guilherme Luz  
Tortorella, coorientador, João Carlos Espíndola Ferreira,  
2019.

130 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Indústria 4.0. 3.  
Manufatura Enxuta. 4. Implementação da Indústria 4.0 e  
Manufatura Enxuta. I. Tortorella, Guilherme Luz. II.  
Ferreira, João Carlos Espíndola. III. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Produção. IV. Título.

Marcos Malinverni Pagliosa

**Método para priorizar a implementação da Indústria 4.0 e Manufatura Enxuta em empresas de manufatura**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Guilherme Luz Tortorella, Dr.  
Orientador

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira Phd.  
Coorientador

Prof. Fernando Antônio Forcellini Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Daniel Jurburg Melnik Dr.  
Universidade de Montevidéu (Videoconferência)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof.<sup>a</sup> Dra Lucila Maria de Souza Campos  
Coordenadora do Programa

---

Prof. Dr. Guilherme Luz Tortorella  
Orientador

Florianópolis 22 de agosto de 2019

Este trabalho é dedicado aos meus amados pais  
Osmar e Gláucia e à minha amada esposa Katie.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me guiar, iluminar e por ter estado comigo durante toda essa jornada, sempre me capacitando e fornecendo os recursos para que eu pudesse seguir em frente.

Agradeço à minha amada esposa Katie, pela confiança, apoio e paciência em entender os meus incontáveis fins de semana dedicados a este trabalho. Gratidão por toda a alegria e amor.

Aos meus amados pais, Osmar e Glaucia, que sempre acreditaram no meu potencial e me apoiaram no alcance dos meus objetivos. Obrigado pelo exemplo, presença e orações.

Agradeço de forma especial ao meu orientador, professor Dr. Guilherme Luz Tortorella, exemplo de profissional focado e dedicado. Obrigado por toda a sua atenção e orientação, os ensinamentos transmitidos e sua disponibilidade foram fundamentais para minha formação e para a elaboração deste trabalho.

Ao meu coorientador, professor Dr. João Carlos Espíndola Ferreira, pela colaboração demonstrada desde o primeiro contato, orientação, atenção, abertura e troca de experiências.

Agradeço a colaboração da empresa onde trabalho pelo apoio à minha qualificação e flexibilidade, liberando-me quando necessário para que eu pudesse me dedicar ao mestrado.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho que, por muitas vezes, precisaram “segurar as pontas” para que pudesse me dedicar e estar presente nas aulas do curso.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho, muito obrigado!

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer).

## RESUMO

As empresas manufatureiras estão inseridas em um ambiente altamente competitivo e constantemente expostas a desafios como o surgimento de conceitos e tecnologias disruptivas. Nesse contexto, as organizações precisam operar com altos padrões de qualidade, produtividade e baixos custos para garantir a própria sobrevivência. Assim sendo, diversas abordagens voltadas à gestão produtiva foram desenvolvidas para apoiar as organizações a alcançarem tais objetivos, dentre as quais, pode-se destacar a já consolidada Manufatura Enxuta (ME) e a recente Indústria 4.0 (I4.0). A partir da adoção de tecnologias oriundas da I4.0, um novo modelo de gestão está se configurando. A I4.0 representa uma nova fase para a manufatura, oferecendo significativos avanços tecnológicos que permitem a integração em tempo real entre todos os participantes da cadeia de valor, tornando-a mais produtiva, inteligente e ágil. A ME, por sua vez, vem sendo amplamente usada e disseminada entre os mais diversos tipos de indústria, tendo como seus principais objetivos eliminar os desperdícios presentes no fluxo de valor, melhoria da qualidade e produtividade e produzir de acordo com a visão do cliente. No entanto, as organizações apresentam dificuldades para entenderem os princípios da I4.0, assim como para integrar suas tecnologias em seus atuais modelos de gestão, tais como a ME. Além disso, não conseguem identificar oportunidades de implementação e melhorias capazes de solucionar problemas e proporcionar ganhos. Apesar de a relevância do tema, existem poucos trabalhos relacionados à integração da I4.0 em empresas onde a ME foi implementada. Nesse sentido, esta pesquisa busca contribuir com essa questão e tem por finalidade analisar como ocorre a integração entre a I4.0 e ME em empresas manufatureiras. Entre os resultados obtidos por este trabalho, pode-se destacar a identificação das nove principais tecnologias da I4.0 e quatorze principais Práticas Enxutas (PEs), a classificação do grau de sinergia existente entre as principais tecnologias e PEs e a proposição de um método de avaliação que permite priorizar a implementação da I4.0 e ME nas áreas produtivas de empresas manufatureiras de acordo com seu grau de maturidade. Esta pesquisa contribui para um melhor entendimento no que tange à I4.0, ME e a integração entre ambas. Além disso, fornece às organizações, argumentos e evidências importantes para priorizar ações e identificar demandas relacionadas a uma implementação concomitante e bem-sucedida em I4.0 e ME.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0. Manufatura enxuta. Tecnologias da Indústria 4.0. Práticas enxutas. Integração.



## ABSTRACT

Manufacturing companies are embedded in a highly competitive environment and constantly exposed to challenges such as the emergence of disruptive concepts and technologies. In this context, organizations need to operate with high standards of quality, productivity and low costs to ensure their survival. In this sense, several approaches to productive management were developed to support organizations in achieving these goals, including the already consolidated Lean Manufacturing (Lean) and the recent Industry 4.0 (I4.0). Since the adoption of technologies from I4.0, a new management model is being configured. I4.0 represents a new phase for manufacturing, offering significant technological breakthroughs that enable a real-time integration among all participants in the value chain, making it more productive, smarter and more agile. Lean in turn, has been widely used and disseminated between the most diverse types of industry, having as its main objectives to eliminate waste in the value stream, improve quality and productivity and produce according to the customer's vision. However, organizations have difficulty understanding the principles of I4.0, as well as integrating their technologies into their current management models, such as Lean. In addition, they cannot identify implementation opportunities and improvements that can solve problems and deliver gains. Despite the relevance of the theme, there are few works related to the integration of I4.0 in companies where Lean was implemented. In this sense, this research seeks to contribute to this issue and aims to analyze how the integration between I4.0 and Lean occurs in manufacturing companies. Among the results obtained by this work, we can highlight the identification of the nine main technologies of I4.0 and fourteen main Lean Practices (LPs), the classification of the degree of synergy between the main technologies and LPs and the proposition of an evaluation method which allows prioritizing the implementation of I4.0 and Lean in the productive areas of manufacturing companies according to their degree of maturity. This research contributes to a better understanding regarding I4.0, Lean and the integration between them. In addition, it provides organizations with important arguments and evidence to prioritize actions and identify demands related to a concomitant and successful implementation in I4.0 and Lean.

**Keywords:** Industry 4.0. Lean. Technologies of Industry 4.0. Lean's practices. Integration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução histórica da Indústria .....	28
Figura 2 - Fases e atividades do SSF .....	30
Figura 3 - Evolução temporal das publicações .....	37
Figura 4 - Países pesquisadores e tipo de pesquisa .....	38

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Divisão da estrutura do trabalho.....	20
Quadro 2 - Artigos eleitos .....	31
Quadro 3 - Levantamento da literatura.....	34
Quadro 4 - Número de artigos publicados em periódicos/eventos .....	36
Quadro 5 - Principais tecnologias da Indústria 4.0.....	41
Quadro 6 - Principais práticas enxutas .....	47
Quadro 7 - Aplicação das tecnologias I4.0 nos níveis do fluxo de valor .....	52
Quadro 8 - Matriz de interação entre as principais tecnologias da I4.0 e PE.....	59
Quadro 9 - Principais tecnologias da Indústria 4.0.....	81
Quadro 10 - Dimensões e critérios de maturidade da I4.0 .....	83
Quadro 11 - Principais práticas enxutas .....	86
Quadro 12 - Dimensões e critérios de maturidade para manufatura enxuta.....	88
Quadro 13 - Requisitos para seleção das áreas.....	99
Quadro 14 - Grau de maturidade <i>mi</i> por área .....	103
Quadro 15 - Grau de maturidade <i>mme</i> por área.....	106
Quadro 16 - Grau de maturidade final normalizado em I4.0 e ME.....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de publicações por país .....	37
Tabela 2 - Característica das áreas produtivas.....	97
Tabela 3 - Perfil demográfico dos gerentes .....	100
Tabela 4 - Número de respondentes por área e perfil demográfico dos líderes e especialistas .....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPPS	<i>Cyber Physical Production Systems</i>
CPS	<i>Cyber Physical Systems</i>
CRM	<i>Customer Relationship Management</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
I4.0	Indústria 4.0
JIT	<i>Just-in-time</i>
ME	Manufatura Enxuta
MRO	Manutenção Reparo e Operação
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PB	Portifólio Bibliográfico
PE	Prática Enxuta
PEs	Práticas Enxutas
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
SMED	<i>Single Minute Exchange of Die</i>
SSF	<i>Systematic Search Flow</i>
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
TRF	Troca Rápida de Ferramentas
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>
WIP	<i>Work In Process</i>
WMS	<i>Warehouse management system</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	16
1.2	JUSTIFICATIVA DO TEMA .....	18
1.3	OBJETIVOS .....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
1.5	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO PESQUISA .....	21
1.6	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	22
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>FASE 1 – TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E AS PRÁTICAS ENXUTAS</b>	<b>25</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	25
2.2	INDÚSTRIA 4.0.....	27
2.3	MANUFATURA ENXUTA.....	29
2.4	MÉTODO .....	30
<b>2.4.1</b>	<b>Protocolo de Pesquisa para a seleção da literatura sobre as tecnologias da I4.0 e as PEs – Fase 1.....</b>	<b>30</b>
2.4.1.1	Estratégia de busca .....	30
2.4.1.2	Consulta em base de dados .....	32
2.4.1.3	Gestão dos documentos .....	32
2.4.1.4	Padronização e seleção dos documentos .....	32
2.4.1.5	Composição do portfólio de documentos .....	33
<b>2.4.2</b>	<b>Análise dos dados – Fase 2 .....</b>	<b>35</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Síntese – Fase 3.....</b>	<b>35</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Escrever – Fase 4 .....</b>	<b>35</b>
2.5	RESULTADO DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: VARIÁVEIS BÁSICAS.....	36
2.6	RESULTADO DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: VARIÁVEIS AVANÇADAS....	39
<b>2.6.1</b>	<b>Principais Tecnologias da I4.0 .....</b>	<b>39</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Principais PE.....</b>	<b>45</b>
2.7	ANÁLISE DAS LENTES TEÓRICAS .....	50
<b>2.7.1</b>	<b>Relação das tecnologias da I4.0 com os níveis do fluxo de valor .....</b>	<b>50</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e as PE .....</b>	<b>54</b>

2.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DIRECIONAMENTOS PARA FUTURAS PESQUISAS .....	60
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63
<b>3</b>	<b>FASE 2 – AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE MATURIDADE PARA A INTEGRAÇÃO ENTRE INDÚSTRIA 4.0 E MANUFATURA ENXUTA</b> .....	<b>78</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	78
3.2	INDÚSTRIA 4.0.....	80
3.3	MANUFATURA ENXUTA.....	85
3.4	MÉTODO PROPOSTO.....	92
<b>3.4.1</b>	<b>Selecionar os critérios de avaliação e áreas produtivas a serem avaliadas .....</b>	<b>92</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Avaliação da importância das dimensões em I4.0 e ME .....</b>	<b>93</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Avaliação do desenvolvimento dos critérios em I4.0 e ME .....</b>	<b>94</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Ranqueamento e priorização das áreas .....</b>	<b>95</b>
3.5	RESULTADOS .....	96
<b>3.5.1</b>	<b>Descrição da empresa .....</b>	<b>96</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Seleção das áreas produtivas .....</b>	<b>97</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Perfil dos respondentes envolvidos.....</b>	<b>100</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Avaliação do grau de maturidade e ranqueamento das áreas produtivas .....</b>	<b>101</b>
3.5.4.1	Avaliação das dimensões em I4.0.....	101
3.5.4.2	Avaliação das dimensões em ME.....	104
3.5.4.3	Avaliação do grau de maturidade final e ranqueamento das áreas.....	108
3.6	CONCLUSÕES E DIRECIONAMENTO PARA FUTURAS PESQUISAS .....	111
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	113
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>119</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>122</b>
	<b>APÊNDICE A – PB FINAL</b> .....	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO PARA AVALIAR O NÍVEL DE IMPORTÂNCIA DAS DIMENSÕES EM I4.0 E ME .....</b>	<b>128</b>
	<b>APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO PARA AVALIAR O GRAU DE DESENVOLVIMENTO DOS CRITÉRIOS EM I4.0 E ME.....</b>	<b>129</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As empresas de manufatura em todo o mundo estão enfrentando enormes desafios devido ao grande e crescente número de requisitos de ordem ambiental, econômica e tecnológica. Para enfrentar tais desafios, essas empresas necessitam gerenciar toda a sua cadeia de valor de uma maneira ágil e eficiente atendendo às expectativas do cliente (GLIGOR; HOLCOMB, 2012). Alinhado a essas demandas, a introdução de novas tecnologias oriundas da 4ª revolução industrial pode auxiliar o atendimento delas além de prover ganhos de produtividade e qualidade (GAO *et al.*, 2015).

O termo “Indústria 4.0” tem sua origem ligada a um projeto estratégico do governo alemão cujo objetivo é prover a indústria alemã com alta tecnologia, elevando, assim, o seu nível de competitividade. A Indústria 4.0 (I4.0) faz referência ao que seria a quarta revolução industrial, sendo este termo usado oficialmente pela primeira vez durante a feira da indústria de Hannover (Hannover Messe) no ano de 2011 (BRETTEL *et al.*, 2014). Segundo Schumacher *et al.* (2016), a I4.0 refere-se aos recentes avanços tecnológicos, nos quais a internet e outras tecnologias funcionam como a estrutura básica para sua integração. Entretanto, Fleury e Fleury (2003) e Santos (2008) salientam que a busca por maior produtividade e qualidade não implica apenas na modernização das tecnologias de produção, visto que a forma de inserção das pessoas no sistema produtivo também precisa ser compatibilizada com essas novas demandas. Nesse sentido, a adoção de abordagens de gestão voltadas à melhoria dos processos é algo comumente observado nas empresas manufatureiras, dentre estas, destaca-se a Manufatura Enxuta (ME), cujos princípios e práticas ganharam notoriedade na década de 1970, a partir da divulgação da pesquisa conduzida pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (WOMACK; JONES, 2004).

A ME, cujos princípios e práticas são oriundos do Sistema Toyota de Produção, trata-se de uma abordagem sociotécnica que engloba práticas e princípios organizacionais com intuito de eliminar sistematicamente os desperdícios ao longo de todo o fluxo de valor (OHNO, 1988; WOMACK; JONES, 2004). Os resultados obtidos a partir da adoção da ME promoveram sua extensão e adaptação para empresas de diversos segmentos (HERLYN, 2011). Segundo Grobner (2007), uma das principais características da ME é a intensa integração humana durante o processo de melhoria contínua, foco nas atividades que agregam valor e a eliminação dos desperdícios.



Nesse sentido, pode-se perceber que a I4.0 e suas avançadas tecnologias, e a ME a qual prima por simplicidade, são abordagens diferentes; porém, apresentam propostas que perseguem os mesmos objetivos, visto que ambas buscam melhorias em produtividade, flexibilidade e qualidade, atuando na eliminação dos desperdícios e orientação para o cliente. Zühlke (2010) afirma que tanto a ME quanto a I4.0 buscam estruturas descentralizadas e preferem estruturas com baixo nível de complexidade em vez de grandes e complexos sistemas. Segundo Kolberg e Zühlke (2015), a combinação da I4.0 com as práticas da manufatura enxuta ou práticas enxutas (PEs) pode ser benéfica e catalisar as mudanças desejadas. Segundo Sanders *et al.* (2017), a I4.0 pode ser vista como suporte para a ME, pois oferece acesso a dados em tempo real, o que favorece o processo de melhoria contínua. Kolberg *et al.* (2017) argumenta que, no contexto da I4.0, a automação e a ME podem ser combinadas para obter maiores benefícios, visto que a I4.0 pode ser considerada como uma evolução lógica dos princípios da ME e colabora para que seu potencial possa ser mais bem explorado. Contudo, também é possível identificar importantes divergências entre as duas abordagens (I4.0 e ME). Existe uma diferença estratégica entre a I4.0 e ME, visto que a ME busca reduzir a complexidade para obter soluções simples por meios simples. Por sua vez, a I4.0 visa o aumento da complexidade e propõe controles descentralizados e assistentes inteligentes. (SANDERS *et al.*, 2017). A ME se adapta bem a ambientes com demanda fixa. Porém, mostra-se limitada frente aos desafios de uma demanda altamente volátil e produtos com ciclo de vida curtos; o que é uma das principais características da I4.0.

Segundo Erol *et al.* (2016) e Sanders *et al.* (2016), várias empresas apresentam dificuldades para entender a ideia geral da I4.0, seus conceitos e princípios específicos. Tais organizações muitas vezes não conseguem identificar oportunidades de implementação e melhorias capazes de solucionar problemas e proporcionar ganhos, uma vez que possuem dúvidas sobre como proceder. Ainda assim, muitas organizações que adotaram a ME começam a se interessar por uma implementação em I4.0, visando ganhos em competitividade, visto que conforme evidenciado por estudos anteriores a I4.0 pode potencializar a ME (ZÜHLKE, 2010; KOLBERG, 2015; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SIBATROVA; VISHNEVSKIY, 2016; SANDERS *et al.*, 2017; TORTORELLA; FETTERMANN, 2017). Assim, apesar de a crescente notoriedade que este tema tem ganhado, ainda existem dúvidas importantes relacionadas à viabilidade e eficácia da integração entre a I4.0 e ME. Nesse sentido, pautado na relevância dessa integração para o contexto industrial e na carência de trabalhos que examinam seus efeitos (GJELDUM *et al.*, 2016; LANDSCHEIDT; KANS, 2016; KOLBERG *et al.*, 2017), essa pesquisa se propôs a explorar a seguinte questão: “*Como ocorre a integração entre a I4.0 e ME*

*em empresas manufatureiras?*”. Para responder a essa pergunta, este trabalho tem por tema a análise de como se dá a integração entre a I4.0 e ME em empresas de manufatura, de modo a proporcionar direcionamentos de melhoria e auxiliar as empresas na implementação da I4.0 e ME. Para tal, realizou-se uma revisão da literatura a fim de identificar as principais tecnologias da I4.0 e PEs usadas em empresas manufatureiras. Posteriormente, verificou-se o grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e PEs levantadas. Ao fim da pesquisa é proposto um método capaz de medir de forma concomitante, o grau de maturidade em I4.0 e ME, e que permite conduzir uma implementação mais holística de ambas as abordagens em áreas produtivas de empresas manufatureiras.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A I4.0 representa o próximo passo na evolução industrial, afetando todas as áreas desde o desenvolvimento de novos produtos até fabricação e distribuição dos bens produzidos (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0, 2014; I-SCOOP, 2017). Segundo pesquisa realizada em 26 países, entre eles o Brasil, os principais setores da indústria esperam até 2020 elevar significativamente o nível de digitalização de seus processos, passando dos 33% atuais para 72%. Além disso, essas empresas buscam reduzir os custos operacionais em aproximadamente 3,6% e aumentar eficiência em 4,1% por ano (PWC, 2016). Tratando-se particularmente do cenário industrial brasileiro, o uso de tecnologias digitais na indústria ainda está pouco difundido, visto que 58% das empresas reconhecem sua importância, porém, menos de a metade as utiliza. No setor automotivo, por exemplo, 37% das empresas não conseguiram identificar o uso de tecnologias ligadas à I4.0. (CNI, 2016).

Segundo Schumacher *et al.* (2016), as empresas geralmente têm dificuldades para entender os princípios subjacentes à I4.0, uma vez que há problemas para relacioná-los com suas estratégias de negócio. Além disso, essas organizações experimentam problemas na identificação de seu atual grau de maturidade em relação à I4.0, não conseguindo identificar dessa forma, oportunidades para sua implementação. Para superar as incertezas e inseguranças das empresas quanto à aplicação das tecnologias da I4.0, fazem-se necessários modelos de maturidade e roteiros de implementação que auxiliem a orientação e alinhamento das estratégias das empresas (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0, 2014).

Por outro lado, abordagens mais consolidadas na indústria, tal como a ME, vêm sendo aplicada em diversos sistemas produtivos e está orientada à redução dos desperdícios, melhoria contínua, orientação para o cliente e altos padrões de qualidade (OHNO, 1988; WOMACK;

JONES, 2004). Contudo, existem evidências de certas dificuldades que ainda precisam ser contornadas para sua implementação. Segundo Araújo (2005), apesar de inúmeras organizações de diversos setores terem alcançado resultados positivos com a adoção da ME, muitos gerentes têm encontrado problemas no emprego de algumas de suas práticas. Segundo Kolberg *et al.* (2016), a ME está chegando ao seu limite frente as grandes variações e mudanças nas demandas do mercado.

Diante desse cenário em que as mudanças acontecem rapidamente é visível a necessidade de os sistemas de manufatura em buscar novos caminhos para manterem-se competitivos. Nesse sentido, acredita-se que a I4.0 pode contribuir significativamente para que muitas barreiras e dificuldades possam ser superadas, visto que ela oferece tecnologias capazes de modificar a realidade das empresas, dentre as quais se destacam a *Internet of Things* (IoT) ou Internet das Coisas, *Cyber Physical Systems* (CPS) ou Sistemas Ciber-Físicos, e Big Data (KENNETH; SCHONBERGER, 2013). Por fim, Gubán e Kovács (2017) afirmam que a aplicação das novas tecnologias da I4.0 poderá criar possibilidades para a solução de problemas, assim como para a melhoria dos processos de produção vigentes.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar como ocorre a integração entre a I4.0 e ME em empresas manufatureiras.

Para alcançar o objetivo geral, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as principais tecnologias da I4.0 e PEs;
- Examinar o grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e PEs; e
- Propor um método de avaliação que permite priorizar a implementação da I4.0 e ME nas áreas produtivas de empresas manufatureiras de acordo com seu grau de maturidade.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O método de trabalho consiste na solução do problema de pesquisa por meio de duas Fases. Nesse sentido, a etapa de contextualização, justificativa de pesquisa e definição do problema foi desenvolvida ao longo desta introdução a fim de suportar a etapa subsequente de construção de teoria para proposição da metodologia de avaliação. Posteriormente, nos

Capítulos 2 e 3 são apresentados as Fases centrais que atendem aos objetivos específicos, conforme mostrado no Quadro 1.

Na Fase 1, por meio de um levantamento da literatura relacionado às tecnologias da I4.0 e PEs existentes nas empresas manufatureiras, busca-se identificar as principais tecnologias da I4.0 e PEs, suas características e aplicações nos diferentes níveis do fluxo de valor. Posteriormente, com base em três critérios conceituais, é proposto uma matriz que demonstre as diferentes interações entre as principais tecnologias da I4.0 e PEs, de modo a se identificar pontos sinérgicos e divergentes existentes entre as tecnologias e PEs.

Em seguida, com base nas oportunidades identificadas, a Fase 2 visa obter um melhor entendimento sobre a integração entre a I4.0 e ME e propõe um método de avaliação da maturidade que permite priorizar a implementação da I4.0 de forma concomitante com a ME em áreas produtivas de empresas manufatureiras. Para atender tal objetivo, realizou-se uma *survey* e entrevistas individuais semiestruturadas para se levantar o grau de maturidade em I4.0 e em ME. Posteriormente, o método proposto é aplicado em uma grande empresa manufatureira em implementação enxuta, para se identificar quais áreas produtivas são mais propensas à implementação concomitante em I4.0 e a ME. O quarto e último capítulo é dedicado às discussões e conclusões da dissertação, focando no objetivo geral e específicos e na sugestão para trabalhos futuros.

Quadro 1 - Divisão da estrutura do trabalho

	<b>OBJETIVOS</b>	<b>QUESTÃO DE PESQUISA</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA</b>	<b>MÉTODOS DE PESQUISA</b>
<b>FASE 1</b>	<p>(i) Identificar as principais tecnologias da I4.0 e PEs;</p> <p>(ii) Examinar o grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e PEs</p>	<p>Quais as principais tecnologias da I4.0 e PEs?</p> <p>Qual o grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e as PEs?</p>	<p>(i) Tecnologias da I4.0</p> <p>(ii) PEs</p>	Revisão sistemática da literatura
<b>FASE 2</b>	(iii) Propor um método de avaliação que permite priorizar a implementação da I4.0 e ME nas áreas produtivas de empresas manufatureiras, de acordo com seu grau de maturidade	Como identificar quais áreas produtivas são mais propensas à implementação concomitante da I4.0 e ME?	<p>(i) I4.0</p> <p>(ii) ME</p>	<p>Pesquisa tipo <i>Survey</i></p> <p>Entrevistas individuais semiestruturadas</p>

## 1.5 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO PESQUISA

Marconi e Lakatos (2002) definem pesquisa como um instrumento fundamental para a resolução de problemas coletivos. Neste trabalho, a pesquisa é classificada segundo alguns critérios (SILVA; MENEZES, 2005), a saber: (i) natureza da pesquisa; (ii) objetivos; (iii) procedimentos técnicos; e (iv) forma de abordagem do problema. Tais critérios foram avaliados para cada uma das Fases desta pesquisa.

Para a Fase 1, quanto à sua natureza é classificada como pesquisa básica, uma vez que busca gerar conhecimentos novos sobre o tema abordado. Quanto ao ponto de vista dos objetivos dessa Fase da pesquisa, possui caráter exploratório e direcionado à geração de conhecimento sobre as principais tecnologias da I4.0 e PEs, assim como em relação à identificação do grau de sinergia existente nas interações entre as tecnologias da I4.0 e PEs. No que se refere aos procedimentos técnicos, essa Fase é classificada como uma pesquisa bibliográfica e visa à identificação de lacunas de conhecimento sobre o tema pesquisado (GIL, 1991). Por fim, no que diz respeito à forma de abordagem do problema, é classificada como pesquisa qualitativa, devido ao fato de utilizar dados e informações oriundos de uma revisão sistemática de literatura para interpretar padrões de enfoque relativos ao tema de pesquisa.

Em relação à Fase 2, a pesquisa é de natureza aplicada, visto que se procura solucionar um problema específico abordado por meio da aplicação prática de um método em uma organização de interesse. (SILVA; MENEZES, 2005). Assim, o método proposto foi aplicado em uma empresa multinacional de grande porte, fabricante de autopeças que se encontra em processo de implementação enxuta e está iniciando a adoção de tecnologias da I4.0. Tal aplicação possui o objetivo de investigar um fenômeno atual no contexto da vida real, de forma a analisar os porquês dos resultados obtidos (YIN, 2001). Já com relação aos objetivos, essa Fase da pesquisa possui um caráter explicativo. Segundo Gil (2010), esse tipo de pesquisa procura identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de determinados fenômenos, aprofundando o conhecimento sobre a realidade. Quanto aos procedimentos técnicos, aplicou-se entrevistas individuais semiestruturadas e pesquisa tipo *survey* para analisar o grau de maturidade em I4.0 e ME em áreas produtivas de uma empresa manufatureira. Por fim, em relação à forma de abordagem do problema nesta Fase, é classificada tanto como quantitativa quanto qualitativa.

Em termos de abordagem geral, a pesquisa é classificada como combinada, visto que lida com a interpretação, análise de dados provenientes da literatura, entrevistas e a aplicação do método proposto. Assim, o uso dessas abordagens de forma combinada possibilita que a

vantagem de uma abordagem minimize a desvantagem da outra, aperfeiçoando a contribuição do estudo (MIGUEL, 2012).

## 1.6 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Para que se possa avaliar o alcance dos objetivos propostos, torna-se necessária uma delimitação do trabalho, de modo que se conheça a sua amplitude. Nesse sentido, embora uma série de medidas tenham sido tomadas visando garantir o caráter científico do presente trabalho, é relevante mencionar algumas delimitações no que tange ao método empregado.

Inicialmente, é importante ressaltar que a revisão da literatura não se propõe a cobrir assuntos como *roadmaps* de implementação das tecnologias da I4.0 e PEs, ou aspectos comportamentais na implementação dessas tecnologias e PEs. Segundo, a pesquisa procura avaliar o grau de maturidade tanto em I4.0 quanto em ME nas áreas produtivas em empresas de manufatura. Entretanto, a metodologia proposta não avalia o impacto dessa associação sobre o resultado de desempenho nessas áreas. Nesse sentido, por mais que o grau de maturidade aponte uma maior propensão para integrar I4.0 e ME em uma determinada área, não se pode assegurar que ela também irá obter melhorias significativas no seu desempenho. Por fim, o método proposto se restringiu a avaliar as áreas produtivas da empresa, o que não quer dizer que a I4.0 e ME não podem ser implementadas em áreas administrativas da organização. Assim, para tal aplicação, eventualmente haveria a necessidade de se fazer possíveis mudanças em relação ao método proposto quanto a seus critérios e dimensões utilizados, visto que existem diferentes características e particularidades nas áreas administrativas que necessitam ser consideradas.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. F. **A Reforma do Serviço Nacional de Saúde: o novo contexto de gestão pública.** Núcleo de Estudos em Administração e Políticas Públicas. Universidade do Minho. 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/3225>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- AVELLA, L.; FERNÁNDEZ, E.; VÁZQUEZ, C.J.; ROEBEL, K.P. Analysis of Manufacturing Strategy as An Exploratory Factor of Competitiveness in the Large Spanish Industrial Firm. **International Journal of Production Economicst**, v. 72, p. 139–157, 2001.
- BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. **How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective.** Information management department (IMD), 2014.
- FLEURY, M. T. L.; FLEURY, A. Estratégias Competitivas e Competências Essenciais: Perspectivas para a Internacionalização da Indústria no Brasil. **Gestão e Produção**, v. 10, n. 2, p. 129-144, 2003.
- FULLERTON, R.R.; WATTERS, M.C. The Production Performance Benefits from JIT Implementation. **A Journal of Operations Management**, v. 19, p. 81-86, 2001.
- GAO, R.; WANG, L.; TETI, R.; DORNFELD, D.; KUMARA, S.; MORI, M.; HELU, M. Cloud-enable prognosis for manufacturing. **Manufacturing technology**, v. 64, n. 2, p. 722-749, 2015.
- GLIGOR, D.M.; HOLCOMB, M.C. Understanding the Role of Logistics Apabilities in Achieving Supply Chain Agility: A Systematic Literature Review, **Supply Chain Management**, v. 17, 2012.
- GUBÁN, M.; KOVÁCS, G. Industry 4.0 Conception. **Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering**. v. 10, n. 1, p. 111-114, 2017.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review. **Conference Proceedings of 49<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences**, p. 3928-3937, 2016.
- HERLYN, W. J. **PPS in der Automobil industrie: Produktionsprogrammplanung von Fahrzeugen und Aggregaten.** München, Carl Hanser, 2011.
- I-SCOOP. **Industry 4.0: the fourth industrial revolution guide to Industrie 4.0.** Disponível em: <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H.G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, 2014.
- KENNETH, C.; SCHONBERGER, V.M. Big Data: A Revolution that will Transform How we Live, Work, and Think. **American Jounal Book Review**, v. 179, n.9, 2013.

- KOJIMA, S.; KAPLINSKY, R. The use of a lean production index in explaining the transition to global competitiveness – the auto components sector in South Africa. **Technovation**, v. 24, n. 3, p. 199-206, 2003.
- KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 10, p.2845-2856, 2017.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M.; **Técnicas de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.
- OHNO, T. **Toyota production system: beyond large scale production**. Productivity Press, Cambridge, 1988.
- POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; OYARZUN, D.; STRICKER, D.; AMICIS, R.D. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. **Computer Graphics and Applications**, v. 35, 2015.
- PWC. **2016 Global industry 4.0 Survey: Building the Digital Enterprise, 2016**. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industry-4.0.html/>. Acesso em: 12 dez. 2017.
- RADZIWON, A.; BILBERGA, A.; BOGERSA, M.; MADSEN, E.S. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. **International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation**, v. 69, p. 1184-1190, 2014.
- SANTOS, F. C. A.; UBEDA, C. L. Os Principais Desafios da Gestão de Competências Humanas em um Instituto Público de Pesquisa. **Gestão & Produção**, v. 15, n. 1, p. 188-199, 2008.
- SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev ed. Florianópolis: UFSC, 2005.
- SCHONBERGER, R. J. Japanese Production Management: An Evolution with Mixed Success. **Journal of Operations Management**, v. 25, p.403-419, 2007.
- SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161-166, 2016.
- SIMPSON, D.F.; POWER, D.J. Use the Supply Relationship to Develop Lean and Green Suppliers. **Supply Chain Management**, v. 10, n.1, p. 60-68, 2005.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A máquina que mudou o mundo**. Rio de Janeiro: Campus, 2004.
- YIN, R. K. **Estudo de caso – planejamento e métodos**. (2ed.). Porto Alegre: Bookman. 2001.
- ZÜHLKE, D. Smart Factory Towards a Factory of Things. **Annual Reviews in Control**, v. 34, n. 1, p. 129-138, 2010.



## 2 FASE 1 – TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E AS PRÁTICAS ENXUTAS

Marcos Malinverni Pagliosa

Guilherme Luz Tortorella

João Carlos Espíndola Ferreira

Submeteu-se em forma de artigo uma versão traduzida para a língua inglesa desta Fase ao *Journal of Manufacturing Technology Management* em Dezembro de 2018

### Resumo:

A Indústria 4.0 (I4.0) trouxe mudanças disruptivas em relação ao modo como os processos produtivos atuais são determinados. Diante da intensa competição existente no contexto das empresas de manufatura, as organizações precisam ficar atentas para o surgimento de novos conceitos e tecnologias capazes de alterar significativamente o modo de como essas empresas operam. Até o momento, muitas empresas têm adotado a manufatura enxuta (ME) como uma forma eficiente de se alcançar melhores resultados e tornarem-se mais competitivas. Porém, com o surgimento das tecnologias da I4.0 muitas dúvidas referentes a compatibilidades entre essas duas abordagens foram levantadas. O objetivo desta Fase da pesquisa é realizar uma análise sistemática da literatura com o objetivo de identificar as principais tecnologias da I4.0 e práticas de ME. Para isso, empregou-se uma metodologia de revisão sistemática na qual foram analisados 93 artigos, que resultou na identificação de nove tecnologias da I4.0 e quatorze práticas de ME. Posteriormente, as nove tecnologias e quatorze práticas foram analisadas em relação a suas aplicações nos diferentes níveis do fluxo de valor e quanto ao grau de sinergia existente nas associações entre as nove tecnologias da I4.0 e quatorze práticas de ME. Esta Fase da pesquisa fornece uma melhor compreensão da literatura existente relacionada com a I4.0, ME e seu relacionamento, assim como aponta as lacunas de pesquisas para fomentar futuros trabalhos.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0. Manufatura enxuta. Tecnologias da Indústria 4.0. Práticas enxutas. Revisão de literatura.

### 2.1 INTRODUÇÃO

As empresas manufatureiras estão inseridas em um ambiente altamente competitivo e constantemente expostas a desafios, como o surgimento de conceitos e tecnologias disruptivas (GLIGOR; HOLCOMB, 2012; SCHUMACHER *et al.*, 2016). Nesse contexto, as organizações precisam operar com altos padrões de qualidade, produtividade e baixos custos para garantir a própria sobrevivência. Assim sendo, inúmeras abordagens foram desenvolvidas para apoiar as organizações a alcançarem tais objetivos. Dentre as quais, podem-se destacar a já consolidada Manufatura Enxuta (ME) e a recente Indústria 4.0 (I4.0).

A partir da adoção de tecnologias oriundas da I4.0, um novo modelo de gestão está se configurando (NASCIMENTO *et al.*, 2019). Segundo Schumacher *et al.* (2016), a I4.0 representa uma nova fase para a indústria, oferecendo significativos avanços tecnológicos que permitem a integração em tempo real entre todos os participantes da cadeia de valor tornando-a mais produtiva, inteligente e ágil. A I4.0 é uma tendência atual no que se refere à automação, digitalização e troca de dados na indústria, aplicando tecnologias, tais como: o *Cyber Physical Systems* (CPS) ou Sistemas Ciber-Físicos, *Internet of Things* (IoT) ou Internet das Coisas e Big Data (I-SCOOP, 2017). As tecnologias da I4.0 permitem que o sistema de produção seja modular e variável, capacitando-o a produzir em massa produtos altamente customizados (KAGERMANN *et al.*, 2013; FETTERMANN *et al.*, 2018). De acordo com Landscheidt e Kans (2016), o emprego da automação pode melhorar a qualidade do produto ao mesmo tempo que torna os processos de fabricação mais estáveis e eficientes. A I4.0 adota o conceito de produção inteligente o qual é capaz de atender novos requisitos de mercado (KOLBERG *et al.*, 2017). A I4.0 se apresenta como uma alternativa de solução para sistemas produtivos que visam alto nível de flexibilidade, agilidade, baixo custo de produção e rapidez de resolução perante os problemas (RADZIWON *et al.*, 2014).

A ME, por sua vez, vem sendo amplamente usada e disseminada entre os diversos tipos de indústria, tendo como seus principais objetivos eliminar os desperdícios presentes no fluxo de valor, melhoria da qualidade e produtividade e produzir de acordo com a visão do cliente (WOMACK; JONES, 2004; JASTI; KODALI, 2015). De acordo com Schonberger (2007), a ME pode ser definida como um conjunto de práticas e princípios que auxiliam as empresas na tarefa de organização e controle da produção. A facilidade de sua aplicação com seus eficientes resultados são alguns dos motivos pelos quais ela foi amplamente aceita, estando atualmente inserida na base do sistema produtivo em um vasto número de organizações (HERLYN, 2011).

De acordo com Burch e Smith (2017), a ME pode auxiliar a empresa a reduzir o uso de recursos e maximizar as receitas, gerando resultados positivos aos *stakeholders*. A ME tem como um de seus objetivos gerar um sistema eficiente, organizado e dedicado nas ações de melhoria contínua e eliminação de desperdícios (SIMPSON; POWER, 2005). Nesse sentido, pode-se constatar que tanto a I4.0 quanto a ME apresentam pontos convergentes, visto que ambas as abordagens buscam melhorias em produtividade, qualidade, focam na eliminação dos desperdícios e estão orientadas para o cliente (BUER *et al.*, 2018).

Segundo Tortorella e Fettermann (2017) e Rossini *et al.* (2019), as Práticas de Manufatura Enxuta ou Práticas Enxutas (PEs) estão positivamente associadas às tecnologias da I4.0, e a implantação de tais tecnologias permite ganhos em desempenho. Sibatrova e Vishnevskiy

(2016) afirmam que a I4.0 pode impactar positivamente no processo de implementação da ME, permitindo que algumas barreiras atualmente existentes sejam superadas, aumentando, assim, as chances de uma implementação bem-sucedida.

No entanto, a ME, usualmente considerada como uma abordagem de baixa tecnologia que prima pela simplicidade de aplicação (DICKMANN, 2008), pode apresentar pontos conflitantes com as modernas tecnologias da I4.0. Além disso, Grobner (2007) enfatiza que a ME é caracterizada por uma intensa integração humana com foco na eficiência, o que pode contrapor a aplicação de tais tecnologias fundamentalmente orientadas à digitalização e flexibilidade dos sistemas produtivos. A necessidade de investimentos para o acesso às novas tecnologias e na escassez de profissionais qualificados são obstáculos que preocupam as organizações (PWC, 2016); podendo, inclusive, tornarem-se em um fator impeditivo para a adoção das novas tecnologias por parte de algumas empresas.

Baseado na relevância das questões levantadas acima, constata-se uma carência de trabalhos que desentram e esclarecem de forma precisa a interação entre a I4.0 e ME em empresas em implementação da ME (GJELDUM *et al.*, 2016; LANDSCHEIDT; KANS, 2016; KOLBERG *et al.*, 2017). Nesse sentido, pode-se formular as seguintes questões de pesquisa: “*quais as principais tecnologias da I4.0 e PEs*”; e “*qual o grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e as PEs?*”. Para responder a essas perguntas, uma revisão sistemática de literatura foi realizada a fim de identificar as principais tecnologias da I4.0 e PEs; e examinar o grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e PEs. Segundo Gil (2010), a revisão de literatura é realizada com o objetivo principal de fornecer fundamentação teórica ao trabalho, assim como identificar o estágio atual do conhecimento que se tem sobre o tema a ser pesquisado.

Além desta seção introdutória, este trabalho está dividido da seguinte forma. A seção 2.2 trata de uma breve descrição da I4.0 e os conceitos inerentes a esta, enquanto a seção 2.3 apresenta os princípios voltados à ME. A seção 2.4 descreve o método de revisão de literatura empregado, cujas análise bibliométrica e discussão dos resultados estão apresentados na seção 2.5 e 2.6, respectivamente. A seção 2.7 finaliza a Fase 1 trazendo as conclusões e direcionamentos futuros de pesquisa.

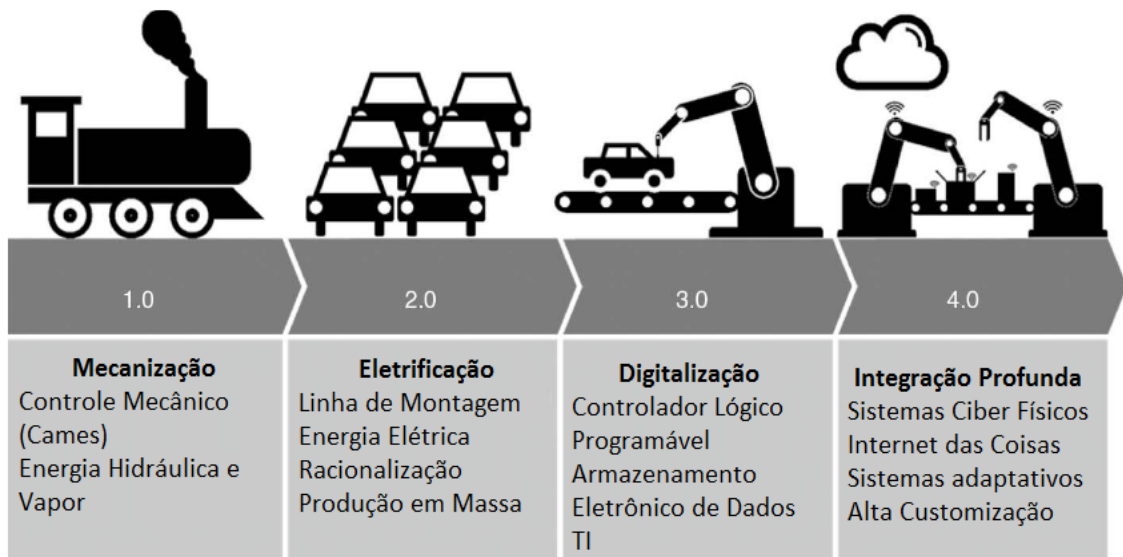
## 2.2 INDÚSTRIA 4.0

A I4.0 pode ser definida como um grupo de tecnologias e conceitos aplicáveis na cadeia de valor de organizações, estabelecendo a interconexão e comunicação em tempo real entre pessoas, equipamentos e produtos (HERMANN *et al.*, 2016). Considerada como a quarta

revolução industrial, as tecnologias da I4.0 permitem um alto nível de comunicação e interação entre os participantes do fluxo de valor (TORTORELLA *et al.*, 2018), capacitando os sistemas produtivos para a customização em massa (LASI *et al.*, 2014; POSADA *et al.*, 2015). A adoção das tecnologias da I4.0 possibilita integrar benefícios oriundos da produção customizada e intermitente com a alta produtividade e custos reduzidos do sistema de produção em massa (TAMÁS *et al.*, 2016; CNI, 2016; XU; CHEN, 2016).

Conforme observado na Figura 1, a terceira revolução industrial data da década de 1970, e teve seu foco na automação de máquinas e processos individuais. Já a I4.0 se concentra na digitalização e integração do “*end to end*” de todos os ativos físicos e na maciça integração dos participantes da cadeia de valor (PWC, 2016).

Figura 1 - Evolução histórica da Indústria



Fonte: Adaptado de Feuber e Park (2017)

A I4.0 é a mais recente tendência quando se trata de automação e troca de dados no sistema produtivo (CNI, 2016; I-SCOOP, 2017). Por meio do CPS, Big Data e IoT é possível integrar equipamentos, pessoas e sistemas produtivos em tempo real, disponibilizar informações relevantes e criar possibilidades para a melhoria nos processos (BOHÁCS *et al.*, 2013; TAMÁS *et al.*, 2016; GUBÁN; KOVÁCS 2017; SANDERS *et al.*, 2017; SCHUH *et al.*, 2017). Além disso, uma de suas principais vantagens frente aos sistemas produtivos atuais está na capacidade de se adaptar rapidamente a cenários com demanda volátil e produtos com ciclo de vida curto (SANDERS *et al.*, 2017). De acordo com Tamás *et al.* (2016), a I4.0 tem gerado importantes alterações no sistema produtivo e criado demanda para novos trabalhos. Nesse sentido, pesquisas recentes abordando o tema evidenciam que existe uma carência de pesquisas

tratando do impacto de suas associações no ambiente da manufatura (GJELDUM *et al.*, 2016; LANDSCHEIDT; KANS, 2016; MARTINEZ *et al.*, 2016; SANDERS *et al.*, 2016; XU; CHEN, 2016; KOLBERG *et al.*, 2017; SANDERS *et al.*, 2017; SANTORELLA, 2017).

### 2.3 MANUFATURA ENXUTA

A ME pode ser descrita como uma abordagem produtiva que abrange uma variedade de práticas produtivas, direcionadas para a redução das variações nos processos (SHAH; WARD 2003), identificação e eliminação de desperdícios ao longo do fluxo de valor (WOMACK; JONES, 1997; OHNO, 1998; SCHONBERGER, 2007; LIKER; FRANZ, 2011). Os benefícios observados e a simplicidade de aplicação da ME são alguns dos motivos pelos quais ela vem sendo amplamente adotada em um vasto número de empresas (FULLERTON; WATTERS, 2001; SIMPSON; POWER, 2005; DENNIS, 2008; BURCH; SMITH 2017), de diferentes segmentos, tais como: manufatura (HERLYN, 2011; CONGER; MILLER, 2013; KANIGOLLA *et al.*, 2014), saúde (HOLM, 2010; AHLSTROM; 2013) e construção civil (BALLARD, 2002; GAO; LOW, 2014).

A ME está baseada no aumento real de produtividade e qualidade e na minimização dos desperdícios presentes ao longo da cadeia de valor (WOMACK; JONES, 2004; SHAH; WARD, 2007). Diversos estudos evidenciaram que a implementação de seus princípios e práticas está positivamente associada à melhoria do desempenho operacional (LIKER; FRANZ, 2011; CONGER; MILLER, 2013; KANIGOLLA *et al.*, 2014; REZENDE *et al.*, 2016).

Cabe destacar que a ME é uma abordagem sociotécnica que considera o ser humano como um fator fundamental de sustentação da melhoria contínua (SCHEIN, 2004; LEONARD; PAKDIL, 2016). Sua implementação resulta em uma abordagem sistemática de vários princípios e práticas de gestão que influenciam os indivíduos e a qualidade do trabalho executado (GETTY, 1999). Os princípios são os elementos do nível estratégico e representam os ideais e as leis do sistema. Womack e Jones (2004) identificam cinco princípios básicos para maximizar o valor e eliminar desperdícios, a saber: (i) definir valor aos olhos do cliente; (ii) definir o fluxo de valor; (iii) fazer o valor fluir; (iv) produção puxada pelo cliente; e (v) buscar a perfeição.

As PEs são os elementos que operacionalizam os princípios (BHAMU; SINGHK, 2014), e tem como objetivo reduzir o desperdício e a variabilidade nos processos de fabricação, proporcionando ganhos nas operações da empresa (SHAH; WARD, 2003). Como exemplos de tais práticas podem-se citar: mapeamento do fluxo de valor, 5S, gestão visual, *kanban*, troca

rápida de ferramentas (TRF), *andon*, entre outras (MELTON, 2005; VINODH, 2011; SANDERS *et al.*, 2017). O contexto e o ambiente inseridos devem ser analisados pela empresa para a escolha das práticas apropriadas. Dessa forma, a tarefa de selecionar a prática adequada, verificar sua aplicabilidade e justificar seu emprego torna-se uma questão importante para os gestores industriais (HERRON; BRAIDEN, 2006).

## 2.4 MÉTODO

A identificação das tecnologias da I4.0 e PEs foi realizada por meio de um levantamento sistemático da literatura. Para tal, utilizou-se o método *Systematic Search Flow* (SSF) ou Fluxo de Busca Sistemática, proposto por Ferenhof e Fernandes (2016), devido à sua consistência e confiabilidade. O método é composto por quatro fases divididas em oito atividades, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Fases e atividades do SSF

Fase	1- Protocolo de pesquisa					2- Análise	3- Síntese	4- Escrever
Atividade	(1.1) Estratégia de busca	(1.2) Consulta em base de dados	(1.3) Gestão dos documentos	(1.4) Padronização e seleção dos documentos	(1.5) Composição do portfólio de documentos	(2.1) Consolidação dos dados	(3.1) Elaboração de relatórios	(4.1) Escrever

Fonte: Adaptado de Ferenhof e Fernandes (2016)

### 2.4.1 Protocolo de Pesquisa para a seleção da literatura sobre as tecnologias da I4.0 e as PEs – Fase 1

A primeira fase da metodologia SSF tem como objetivo definir o protocolo de pesquisa e é dividida em cinco atividades, a saber: (i) estratégia de busca; (ii) consulta em banco de dados; (iii) gestão dos documentos; (iv) padronização e seleção dos documentos; e (v) composição do portfólio de documentos.

#### 2.4.1.1 Estratégia de busca

Esta atividade busca a definição dos eixos de pesquisa e, conseqüentemente, da fórmula de pesquisa com as palavras-chave. De acordo com Ferenhof e Fernandes (2016), a estratégia de busca abrange um conjunto de procedimentos que definem os mecanismos de pesquisa e

recuperação de informações. Um ponto importante dessa atividade é o uso adequado dos operadores lógicos e relacionais, visto que eles influenciam na assertividade e retorno da busca.

À medida que a pesquisa procura investigar as tecnologias da I4.0 e as PEs, definiu-se dois eixos de pesquisa, sendo estes “Indústria 4.0” e “Lean”. Para cada eixo da pesquisa definiu-se um comando de busca por meio da combinação de palavras-chave e operadores lógicos e relacionais.

Realizou-se uma primeira busca na base de dados *Scopus*, devido ao seu caráter interdisciplinar e por ter consistência na indexação de conteúdo (FERENHOF; FERNANDES, 2016), apresentando um total de 1.332 artigos. Para verificar se o comando de busca está adequado, realizou-se um teste de aderência com o objetivo de validar as palavras-chave definidas. Para isso, elegeu-se cinco artigos que continham títulos alinhados com o tema de pesquisa e com maior número de citação dentre os 1.332 artigos encontrados na primeira busca. Os cinco artigos eleitos com número de citações são apresentados por meio do Quadro 2.

Quadro 2 - Artigos eleitos

Nº artigo	Título Artigos	Nº citação
1	LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. <b>Manufacturing Letters</b> , v. 3, p. 18-23, 2015.	689
2	BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. <b>International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering</b> , v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.	383
3	ZÜEHLKE, D. Smart Factory - Towards a factory-of-things. <b>Annual Reviews in Control</b> , v. 34, n. 1, p. 129-138, 2010.	343
4	KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. <b>IFAC-Papers Online</b> , v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.	79
5	SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. <b>Journal of Industrial Engineering and Management</b> , v. 9, n. 3, p. 811-833, 2016.	33

Em seguida, as palavras-chave dos cinco artigos eleitos são comparadas com as palavras-chave usadas no comando de busca. Com base nessa comparação, é possível verificar se as palavras-chave dos artigos eleitos estão presentes no comando de busca, usado para a pesquisa, ou se ainda existe necessidade de se aprimorar o comando de busca. Ao realizar esse teste, foi possível verificar que as palavras-chave dos artigos já estavam contempladas nas palavras-chave definidas para o comando de busca, sendo ele considerado dessa forma, adequado pelos

pesquisadores. O comando de busca utilizado para a procura é apresentado em seguida no Quadro 3.

#### 2.4.1.2 Consulta em base de dados

Objetivando definir os bancos de dados para a pesquisa, considerou-se dois pontos: (i) banco de dados relacionados com a área da engenharia; e (ii) banco de dados utilizados em outros trabalhos de revisão bibliográfica, relacionados com a mesma área de pesquisa, por exemplo, Paslauski (2016), Augusto (2017) e Pereira (2018). Quatro bases de dados foram selecionadas, a saber: *Scopus*, *Web of Science*, *ProQuest* e *Emerald*. A pesquisa foi realizada em 10 de janeiro de 2018, não houve delimitação temporal das publicações, e o número total de documentos selecionados foi de 1.526.

A seleção do banco de dados possibilitou realizar uma pesquisa booleana complexa com *strings* de pesquisa. Por meio da pesquisa booleana é possível combinar palavras-chave e construir relações entre os termos da pesquisa para identificar documentos que contêm a fração da literatura pesquisada (EBSCO, 2018). Além de os filtros de busca relacionados a palavras-chave, foram usados filtros para o idioma (inglês) e tipo de publicação (*journal article* e *conference article*), totalizando 1.090 artigos.

#### 2.4.1.3 Gestão dos documentos

Esta atividade visa organizar a bibliografia, separar o retorno da busca dos eixos de pesquisa por meio de *softwares* dedicados a organizar a bibliografia, agilizar o processo de procura, filtro e contagem de documentos. O *software EndNote® X7 (Thomson Corporation, 2013) (EndNote)* foi escolhido pelos pesquisadores para executar essa atividade. Por meio do *EndNote* foi possível criar pastas para cada banco de dados e importar informações relevantes sobre os artigos selecionados.

#### 2.4.1.4 Padronização e seleção dos documentos

A padronização e seleção dos documentos trata do processo de criação dos filtros para a seleção dos artigos. Inicialmente, verificou-se a existência de documentos duplicados entre os 1.090 artigos, o que levou a exclusão de 68 documentos. Em seguida, o alinhamento com o tema da pesquisa dos 1.022 trabalhos restantes foi verificado de acordo com três aspectos: (i) título, (ii) palavras-chave e (iii) resumo. Com referência ao primeiro aspecto, 333 dos 1.022 artigos foram desconsiderados devido aos títulos que não demonstravam relação com o tema



de pesquisa. Segundo, analisou-se as palavras-chave dos 689 artigos restantes, dos quais 197 foram excluídos, pois não se identificou uma ligação clara e adequada entre suas palavras-chave e o tema abordado. Terceiro, verificou-se o resumo de 492 artigos, e ao final desse processo, apenas 116 deles estavam alinhados com o tópico da pesquisa. Por fim, foram excluídos 14 dos 116 artigos, pois não apresentaram seus artigos completos disponíveis, por conseguinte, realizou-se uma análise completa do conteúdo dos 102 artigos restantes.

#### 2.4.1.5 Composição do portfólio de documentos

Na última atividade da primeira fase (atividade 1.5), a composição do portfólio bibliográfico (PB) é finalmente concluída. Essa atividade envolveu a leitura integral de todos os 102 artigos, permitindo, dessa forma, uma filtragem final para excluir artigos desalinhados com o tema da pesquisa. Assim, nove artigos foram excluídos, totalizando um PB final de 93 artigos claramente alinhados com o tema pesquisado (ver Apêndice A), conforme mostra o Quadro 3.

Quadro 3 - Levantamento da literatura

		<b>Quantitativo das bases de dados</b>			
<b>Palavras-chave</b>		<i>Scopus</i>	<i>Web of Science</i>	<i>ProQuest</i>	<i>Emerald</i>
	<i>"INDUSTRY 4.0" OU "CYBER PHYSICAL SYSTEM" OU "CPS" OU "SMART FACTORY" OU "SMART MANUFACTURING" OU "INTERNET OF THINGS" OU "IOT" E "LEAN"</i>	1.332	58	76	60
<b>Crítérios de análise das publicações</b>	<b>Total</b>	1.526			
	Tipo do documento e idioma	1.090 (-436)			
	Artigos não duplicados	1.022 (-68)			
	Títulos alinhados	689 (-333)			
	Palavras-chave alinhadas	492 (-197)			
	Resumo alinhados	116 (-376)			
	Disponíveis	102 (-14)			
	Leitura integral	93 (-9)			
<b>Portfólio final de artigos seleccionados</b>		93			

### 2.4.2 Análise dos dados – Fase 2

A segunda fase tem como objetivo consolidar os dados (atividade 2.1). Nesta fase, o pesquisador dedica-se à análise e interpretação dos dados bibliométricos que ajudam a estabelecer relações de significância e a evidenciar fatores relevantes à pesquisa (FERENHOF; FERNANDES, 2016). Desse modo, a análise das variáveis foi dividida em duas categorias, sendo elas variáveis básicas e avançadas. As variáveis básicas analisadas foram: (i) número de publicações por periódicos; (ii) evolução da pesquisa ao longo dos anos; (iii) países onde as pesquisas ocorreram; e (iv) tipo de estudo realizado sendo estes classificados como estudos teóricos ou práticos. Quanto à análise das variáveis avançadas, buscou-se identificar: (i) quais são as principais tecnologias da I4.0 empregadas nas empresas de manufatura; e (ii) quais são as principais PEs empregadas nas empresas de manufatura?

### 2.4.3 Síntese – Fase 3

Nesta fase (atividade 3.1), as deduções sobre o tema são construídas, sendo posteriormente, agrupadas e condensadas em relatórios, tabelas e gráficos. Segundo Ferenhof e Fernandes (2016), o processo de síntese dos dados permite a geração de novos conhecimentos. Nesse sentido, as informações extraídas da pesquisa foram analisadas sob o olhar de três lentes teóricas, sendo: (i) os níveis do fluxo de valor onde as tecnologias da I4.0 estão sendo empregadas; (ii) quais tecnologias da I4.0 estão em sinergia com as PE; e (iii) quais tecnologias da I4.0 estão em dissonância com as PEs. Para facilitar tal processo, desenvolveu-se uma matriz de conhecimento no *software* MS-Excel® Microsoft Corporation, 2010). A síntese será apresentada com mais detalhes nas seções seguintes. Por fim, cabe destacar que nessa fase levantam-se as lacunas de conhecimento existentes para sugestão de temas para futuras pesquisas.

### 2.4.4 Escrever – Fase 4

A última fase tem como objetivo a consolidação e registro dos resultados da pesquisa por meio da escrita científica. Nesta atividade (atividade 4.1) é preciso resgatar o objetivo da revisão de literatura, assim como os resultados obtidos nas fases de análise e síntese. Por fim, com o auxílio da matriz do conhecimento e de relatórios, o pesquisador passa a fundamentar a escrita dos resultados (FERENHOF; FERNANDES, 2016).

## 2.5 RESULTADO DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: VARIÁVEIS BÁSICAS

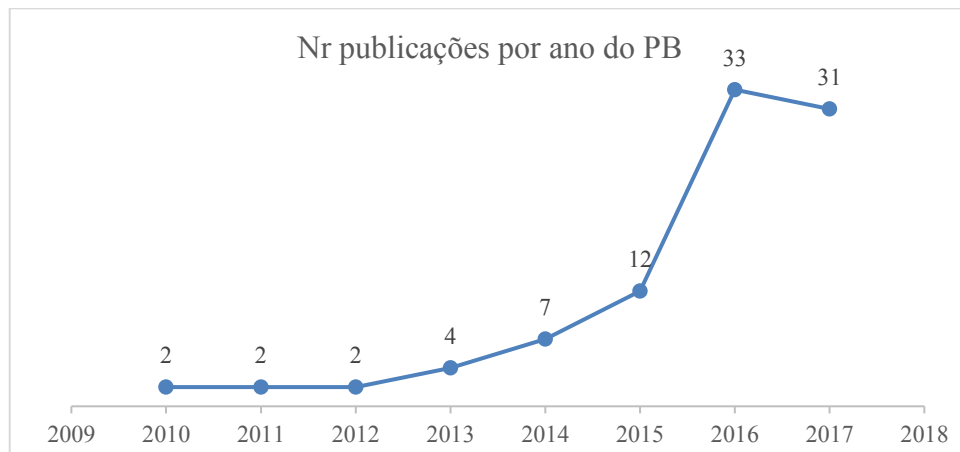
Com base no PB de 93 publicações utilizadas para esta pesquisa, identificou-se que 43 artigos foram publicados em 35 periódicos, ao passo que 50 artigos foram obtidos de 37 diferentes conferências. Referente aos eventos, cabe destacar duas conferências, a saber: *Changeable, Agile, Reconfigurable & Virtual Production Conference* e *International Federation of Automatic Control*, com quatro publicações cada. Quanto aos periódicos, pode-se destacar o *International Journal of Production Research*, também com quatro publicações. O Quadro 4 mostra a distribuição de publicações por periódico/evento contidos no PB.

Quadro 4 - Número de artigos publicados em periódicos/eventos

Evento científico	Periódico	Descrição	Total de publicações
X		Changeable, Agile, Reconfigurable & Virtual Production Conference	4
X		International Federation of Automatic Control	4
	X	International Journal of Production Research	4
	X	Advances in Manufacturing	3
X		50 <sup>th</sup> Conference on Manufacturing Systems	3
X		9 <sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprise Technology	2
X		6 <sup>th</sup> Conference on Learning Factories	2
X		27 <sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing	2
X		49 <sup>th</sup> Conference on Manufacturing Systems	2
X		International Conference on Advances in Production Management Systems	2
	X	International Journal of Innovation Management	2
X		International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation	2
X		Outros 29 eventos	29
	X	Outros 32 periódicos	32

Após a análise dos periódicos, verificou-se a evolução do número de publicações durante os anos. Apesar de não ter ocorrido delimitação temporal na etapa de seleção dos documentos do PB, observa-se que todas as publicações estão concentradas no período compreendido entre os anos de 2010 e 2017 como mostra a Figura 3. Tal feito pode ser explicado em virtude de o tema I4.0 ser considerado novo e devido à pesquisa estar contemplando somente trabalhos que correlacionam os temas “Lean” com “I4.0”. Assim, identificou-se que 68,8% das publicações do PB correspondem aos dois últimos anos. Além disso, as publicações apresentam um pico de 33 artigos no ano de 2016, permanecendo uma tendência semelhante em 2017.

Figura 3 - Evolução temporal das publicações



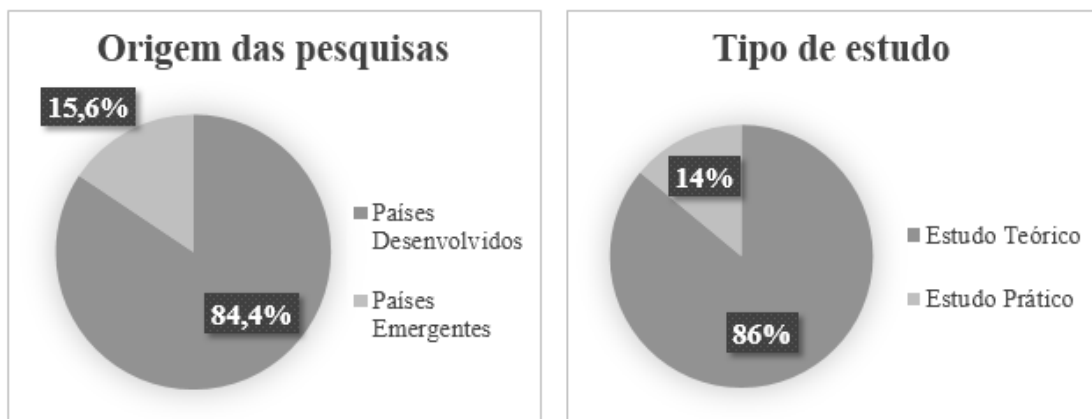
Quanto aos países onde os estudos foram realizados, pode-se destacar a Alemanha com 32 publicações, correspondendo a 31% de todo o PB. Em seguida, EUA e China apresentam sete e seis publicações respectivamente, conforme mostra a Tabela 1. Ao total, 32 diferentes países foram envolvidos, e 84,4% das pesquisas ocorreram em países desenvolvidos (Europa e América do Norte) e 15,6% em países emergentes (Ásia, África e América do Sul), como mostra a Figura 4. Tal fato denota que o presente tema tem recebido maior atenção pelo grupo dos países desenvolvidos, dado que tais países são amplamente industrializados e possuem melhores recursos para desenvolvimento de pesquisa e tecnologia. Além disso, vale ressaltar que devido ao fato de a Alemanha ter sido o lugar onde a I4.0 foi reconhecida pela primeira vez, é compreensível esperar-se que a maioria das publicações encontradas no PB tenha sido desenvolvida nesse país.

Tabela 1 - Número de publicações por país

Contexto socioeconômico	País	Total de publicações
Europa e América do Norte	Alemanha	32
	Áustria	4
	Hungria	4
	Inglaterra	4
	Noruega	4
	Itália	3
	França	2
	Grécia	2
	Polônia	2
	Portugal	2
	República Checa	2

	Suécia	2
	Croácia	2
	Estados Unidos	7
	Outros 13 países	13
América do Sul	Brasil	4
	China	6
Àsia	Malásia	2
	Taiwan	3
África	África do Sul	2

Figura 4 - Países pesquisadores e tipo de pesquisa



Outro aspecto analisado diz respeito ao tipo do estudo realizado, sendo estes classificados nas categorias estudos teóricos ou estudos práticos. Segundo Demo (2009), o estudo teórico promove a discussão e possíveis revisões sobre o tema abordado, visando a aprimorar os fundamentos teóricos. Já o estudo prático busca a comprovação empírica de algo, por meio de experimentos ou pela observação de determinado contexto, servindo para embasar e comprovar aquilo que foi apresentado conceitualmente. Nesse sentido, identificou-se que o maior número dos estudos é de natureza teórica (86% das publicações), ou seja, tais estudos simplesmente imaginaram ou conceitualmente propuseram algumas relações entre I4.0 e PEs sem uma validação empírica. Por sua vez, apenas 14% dos estudos foram de natureza prática, verificando de fato como tais relações ocorreram, seja por meio de *surveys*, estudos de caso ou pesquisa-ação realizadas em empresas manufatureiras que implementaram ambas as abordagens, conforme mostra a Figura 4.

## 2.6 RESULTADO DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: VARIÁVEIS AVANÇADAS

### 2.6.1 Principais Tecnologias da I4.0

Conforme mencionado anteriormente, a análise das variáveis avançadas desta pesquisa aborda a identificação das principais tecnologias da I4.0 e PEs existentes em empresas manufatureiras. Nesse sentido, o Quadro 5 apresenta as principais tecnologias da I4.0 elencadas na literatura de acordo com sua frequência de citação.

Dentre as nove tecnologias identificadas, pode-se notar que a frequência dessas citações varia significativamente. Tal fato pode ser explicado por elas possuírem características, aplicações e objetivos diferentes. A tecnologia identificada com maior frequência de citação foi a IoT (64 citações). Sua alta frequência de citação pode ser explicada devido à sua grande versatilidade, podendo ser aplicada de inúmeras formas e em diversos ambientes (ISLAM *et al.*, 2015; SHARIATZADEH *et al.*, 2016). Os avanços tecnológicos conquistados, a facilidade de acesso e a redução no custo para se adquirir a internet são alguns dos fatores que contribuíram positivamente para a IoT ser amplamente disseminada. Além disso, por se tratar de uma tecnologia que serve muitas vezes como base para outras tecnologias da I4.0 (p. ex.: CPS, computação em nuvem e simulação), a IoT é vista como uma porta de entrada para a I4.0 (CNI, 2016; TAMÁS *et al.*, 2016; XU; CHEN, 2016).

Em seguida, a tecnologia com maior número de citação é o CPS (58 citações). O CPS pode ser definido como objetos físicos equipados com *software* que lhes permitem estabelecer comunicação com outros participantes de um mesmo sistema (BAGHERI *et al.*, 2015). Essa tecnologia é similar à IoT, visto que utiliza a mesma arquitetura baseada na troca de dados possibilitada por uma rede. Porém, o CPS promove uma maior troca de dados e informações destinadas à combinação e coordenação entre os elementos físicos e os sistemas computacionais presentes na manufatura (RAD *et al.*, 2015; HERMANN *et al.*, 2016). Por meio do CPS os produtos passam a estar dotados da capacidade de autogestão, e a fábrica pode operar dentro do conceito de *smart factory* ou fábrica inteligente (CHIANG; LEE, 2017). Nesta, os sistemas de produção se tornam *Cyber Physical Production Systems* (CPPS) ou sistemas ciber-físicos de produção, capacitando a manufatura a operar em tempo real de uma maneira remota e independente (ALMADA-LOBO, 2016).

Dentre as tecnologias com menor número de citações identificadas na pesquisa têm-se a *Simulation* ou simulação com 20 citações e a *Additive Manufacturing* ou manufatura aditiva, com 16 citações. Segundo Brettel *et al.* (2014), o nível de virtualização de processos em que a simulação e a manufatura aditiva estão inseridas depende do porte da empresa, uma vez que

pequenas e médias empresas muitas vezes não possuem recursos destinados a esses fins. Especificamente em relação à tecnologia de simulação, seu uso pode ser potencializado para informações das empresas e análise de dados em tempo real (WANG *et al.*, 2016; MACHOVA, 2018). Nesse sentido, o uso da simulação oferece ganhos relacionados à redução de tempo, principalmente, nas fases iniciais do desenvolvimento de produtos e processos. Mais especificamente, torna-se possível construir protótipos virtuais, validar conceitos, realizar testes e análises de *design*, além de mitigar a ocorrência de erros e falhas (QU *et al.*, 2011). Por fim, de acordo com Brettel *et al.* (2014), a crescente utilização dos sistemas de informação e comunicação permite a engenharia digital de novos produtos e processos de produção de uma maneira mais flexível, possibilitando a rápida inovação de produtos.

A manufatura aditiva compreende tecnologias, tais como impressora 3D em níveis industriais (RUBMANN *et al.*, 2015). Além disso, refere-se a processos controlados por um sistema computadorizado, nos quais o material é unido e solidificado camada por camada, formando objetos de formas variadas baseadas em um modelo digital (TAUFIK; JAIN, 2013). Esta apresenta um bom potencial de aplicação para a produção de pequenos lotes de produtos customizados, complexos e leves. Nesse sentido, existem iniciativas de aplicação em indústrias renomadas como a aeroespacial (turbinas de aviões), na qual houve ganhos com redução de matérias-primas, diminuição do peso dos componentes e do tempo de produção (MIT TECHNOLOGY REVIEW, 2018).



Quadro 5 - Principais tecnologias da Indústria 4.0

Código	Tecnologia I4.0	Definição/objetivos	Pesquisadores	Estudo teórico	Estudo prático	Frequência
t <sub>1</sub>	Internet of Things (IOT) Internet das coisas	Possibilita a interatividade entre pessoas e objetos para a troca de dados e informações entre todos os objetos conectados a internet	ZÜEHLKE (2010); TAO <i>et al.</i> (2011); STRUKER; WEPNER (2012); SPATH <i>et al.</i> (2013); XU <i>et al.</i> (2013); DUGENSKE; LOUCHEZ (2014); NOONEN; JONES (2014); RADZIWON <i>et al.</i> (2014); REN <i>et al.</i> (2014); SCHUH <i>et al.</i> (2014); ZHANG (2014); FLEISCH <i>et al.</i> (2015); KIRAZLI; HORMANN (2015); KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); LOBO (2015); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); RUSSMANN <i>et al.</i> (2015); WEYER <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); ARNOLD (2016); AYDOS; FERREIRA (2016); BUTZER (2016); DAVE <i>et al.</i> (2016); EDWARDS; RAMIREZ (2016); EROL <i>et al.</i> (2016); GIAIMO <i>et al.</i> (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); MARTINEZ <i>et al.</i> (2016); MICIETA <i>et al.</i> (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); RONG <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); SCHUMACHER <i>et al.</i> (2016); SHARIATZADEH <i>et al.</i> (2016); SHIH <i>et al.</i> (2016); STOCK; SELIGER (2016); STOJKIC <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); VALMOHAMMADI (2016); WANG <i>et al.</i> (2016); XU; CHEN (2016); ALIAS <i>et al.</i> (2017); BASSI (2017); CHEN <i>et al.</i> (2017); CHIANG; LEE (2017); CHROMJAKOVÁ; HRUSECKA (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); FERA <i>et al.</i> (2017); FERRERA <i>et al.</i> (2017); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); KIEL; <i>et al.</i> (2017); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); LEE <i>et al.</i> (2017a); LEE <i>et al.</i> (2017 b); LIAO <i>et al.</i> (2017); MORA <i>et al.</i> (2017); MARJANI <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); SACEY <i>et al.</i> (2017); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017); TAMÁS (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017); TRSTENJAK; COSIC (2017).	56	8	64

t <sub>2</sub>	<p><i>Cyber physical system (CPS)</i> Sistemas cyber físicos</p>	<p>Permite integração entre as pessoas e os sistemas físicos em tempo real por meio do uso de avançadas tecnologias de sistemas de computação, comunicação e controle (espaço cibernético).</p>	<p>BROY <i>et al.</i> (2012); SPATH <i>et al.</i> (2013); BRETTEL <i>et al.</i> (2014); DUGENSKE; LOUCHEZ (2014); REN <i>et al.</i> (2014); SCHUH <i>et al.</i> (2014); ZHANG (2014); BAGHERI <i>et al.</i> (2015); KERN <i>et al.</i> (2015); LEE <i>et al.</i> (2015); LOBO; (2015); KANISURU <i>et al.</i> (2015); KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); RANZ <i>et al.</i> (2015); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); WEYER <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); BUTZER (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); ELEFThERIADIS; ESMAEILIAN <i>et al.</i> (2016); MYKLEBUST (2016); EROL <i>et al.</i> (2016); GIAIMO <i>et al.</i> (2016); GRONAU (2016); KOLBERG <i>et al.</i> (2016); MARTINEZ <i>et al.</i> (2016); NUNES (2016); PRINZ <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); SHARIATZADEH <i>et al.</i> (2016); SCHUMACHER <i>et al.</i> (2016); STOCK; SELIGER (2016); STOJKIC <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); WANG <i>et al.</i> (2016); XU; CHEN (2016); ALIAS <i>et al.</i> (2017); BASSI (2017); CHEN <i>et al.</i> (2017); CHIANG; LEE (2017); CHROMJAKOVÁ; HRUSECKA (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); KARAKOSE; YETIS (2017); KIEL; <i>et al.</i> (2017); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); LEE <i>et al.</i> (2017b); LIAO <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); SACKKEY <i>et al.</i> (2017); STOCK; SELIGER (2016); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017); RODSETH <i>et al.</i> (2017); TAMÁS (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017); TRSTENJAK; COSIC (2017); WAGNER <i>et al.</i> (2017).</p>	51	7	58
t <sub>3</sub>	<p><i>Cloud computing</i> Computação em nuvem</p>	<p>Os CPSs irão gerar grandes volumes de dados (Big Data), a computação em nuvem servirá para armazenar esses dados que poderão ser acessados de qualquer lugar.</p>	<p>ZÜEHLKE (2010); TAO <i>et al.</i> (2011); BROY <i>et al.</i> (2012); STRUKER; WEPPNER (2012); SPATH <i>et al.</i> (2013); NOONEN; JONES (2014); REN <i>et al.</i> (2014); ZHANG (2014); LOBO (2015); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); RUSSMANN <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); ARNOLD (2016); BUTZER (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); EROL <i>et al.</i> (2016); ESMAEILIAN <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); SHARIATZADEH <i>et al.</i> (2016); SCHUMACHER <i>et al.</i> (2016); STOCK; SELIGER (2016); STOJKIC <i>et al.</i> (2016); WANG <i>et al.</i> (2016); XU; CHEN (2016); ALIAS <i>et al.</i> (2017); BASSI (2017); CHEN <i>et al.</i> (2017); CHROMJAKOVÁ; HRUSECKA (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); FERRERA <i>et al.</i> (2017); KARAKOSE; YETIS (2017); LEE <i>et al.</i> (2017a); LIAO <i>et al.</i> (2017); MARJANI <i>et al.</i> (2017); MORA <i>et al.</i> (2017); MOURTZIS <i>et al.</i> (2017a); MOURTZIS <i>et al.</i> (2017b); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); SACKKEY <i>et al.</i> (2017); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017); TRSTENJAK; COSIC (2017).</p>	38	4	42

<i>t</i> <sub>4</sub>	Big Data	A vasta utilização de sensores e sistemas de controle utilizados na indústria resulta na geração de uma enorme quantidade de dados. Big Data é o termo que descreve o imenso volume de dados estruturados ou não e o seu gerenciamento.	LEE <i>et al.</i> (2014); REN <i>et al.</i> (2014); SCHUH <i>et al.</i> (2014); BAGHERI <i>et al.</i> (2015); FLEISCH <i>et al.</i> (2015); KIRAZLI; HORMANN (2015); LOBO (2015); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); RUSSMANN <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); BUTZER (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); EDWARDS; RAMIREZ (2016); ESMAEILIAN <i>et al.</i> (2016); NUNES (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); STOCK; SELIGER (2016); STOJKIC <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); WANG <i>et al.</i> (2016); ALIAS <i>et al.</i> (2017); BASSI (2017); CHEN <i>et al.</i> (2017); CHROMJAKOVÁ; HRUSECKA (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); LEE <i>et al.</i> (2017a); LIAO <i>et al.</i> (2017); MORA <i>et al.</i> (2017); MARJANI <i>et al.</i> (2017); SACKY <i>et al.</i> (2017); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017); RODSETH <i>et al.</i> (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017); TRSTENJAK; COSIC (2017); WAGNER <i>et al.</i> (2017).	34	3	37
<i>t</i> <sub>5</sub>	<i>Horizontal/vertical integration</i> Integração horizontal e vertical	Uso da tecnologia para integrar os sistemas de informação de toda a cadeia de valor que estará conectada e automatizada pela digitalização de dados.	YONN <i>et al.</i> (2011); TAO <i>et al.</i> (2011); BROY <i>et al.</i> (2012); STRUKER; WEPPNER (2012); SPATH <i>et al.</i> (2013); IBIRA <i>et al.</i> (2015); LOBO (2015); KIRAZLI; HORMANN (2015); RANZ <i>et al.</i> (2015); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); RUSSMANN <i>et al.</i> (2015); WEYER <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); ARNOLD (2016); BUTZER (2016); EROL <i>et al.</i> (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); SCHUMACHER <i>et al.</i> (2016); STOJKIC <i>et al.</i> (2016); WANG <i>et al.</i> (2016); CHEN <i>et al.</i> (2017); CHIANG; LEE (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); FERRERA <i>et al.</i> (2017); KIEL; <i>et al.</i> (2017); LEE <i>et al.</i> (2017b); LIAO <i>et al.</i> (2017); MORA <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017).	26	4	30
<i>t</i> <sub>6</sub>	<i>Advanced robots</i> Robotização avançada	Robôs que utilizam inteligência artificial e conceitos como “machine learning” capazes de executar tarefas com alto nível de complexidade com o mínimo de interação humana.	KIRAZLI; HORMANN (2015); LOBO (2015); RANZ <i>et al.</i> (2015); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); RUSSMANN <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); BUTZER (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); EDWARDS; RAMIREZ (2016); EROL <i>et al.</i> (2016); ESMAEILIAN <i>et al.</i> (2016); MICIETA <i>et al.</i> (2016); NUNES (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); SCHUMACHER <i>et al.</i> (2016); STOCK; SELIGER (2016); ALIAS <i>et al.</i> (2017); CHEN <i>et al.</i> (2017); CHROMJAKOVÁ; HRUSECKA (2017); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); LEE <i>et al.</i> (2017a); LIAO <i>et al.</i> (2017); MORA <i>et al.</i> (2017); MOURTZIS <i>et al.</i> (2017b); SACKY <i>et al.</i> (2017); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017).	25	1	26

<i>t</i> <sub>7</sub>	<i>Augmented reality</i> Realidade aumentada	Usa a tecnologia para tornar a informação interativa ao adicionar uma sobreposição de conteúdo digital e informações relevantes no mundo em torno do usuário.	YONN <i>et al.</i> (2011); KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); RANZ <i>et al.</i> (2015); RUSSMANN <i>et al.</i> (2015); WEYER <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); ARNOLD (2016); BUTZER (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); EDWARDS; RAMIREZ (2016); NUNES (2016); ALIAS <i>et al.</i> (2017); CHROMJAKOVÁ; HRUSECKA (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); LEE <i>et al.</i> (2017a); LEE <i>et al.</i> (2017b); LIAO <i>et al.</i> (2017); MORA <i>et al.</i> (2017); MOURTZIS <i>et al.</i> (2017a); MOURTZIS <i>et al.</i> (2017b); SACKY <i>et al.</i> (2017).	18	3	21
<i>t</i> <sub>8</sub>	<i>Simulation</i> Simulação	Simula de modo virtual conceitos, aplicação e construção de protótipos e processos por meio de recursos computacionais.	YONN <i>et al.</i> (2011); TAO <i>et al.</i> (2011); SCHUH <i>et al.</i> (2014); KANISURU <i>et al.</i> (2015); KIBIRA <i>et al.</i> (2015); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); RUSSMANN <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); GRONAU (2016); NUNES (2016); PRINZ <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); CHROMJAKOVÁ; HRUSECKA (2017); KIEL; <i>et al.</i> (2017); MORA <i>et al.</i> (2017); SACKY <i>et al.</i> (2017); TAMÁS (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017).	18	2	20
<i>t</i> <sub>9</sub>	<i>Additive manufacturing</i> Manufatura aditiva	É um processo aditivo de construção de objetos, camada sobre camada a partir de dados e modelos 3D.	DUGENSKE; LOUCHEZ (2014); LOBO (2015); RANZ <i>et al.</i> (2015); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); RUSSMANN <i>et al.</i> (2015); ANG (2016); BRETTEL <i>et al.</i> (2016); DOH <i>et al.</i> (2016); RONG <i>et al.</i> (2016); SCHUMACHER <i>et al.</i> (2016); STOCK; SELIGER (2016); ALIAS <i>et al.</i> (2017); BASSI (2017); MORA <i>et al.</i> (2017); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017).	15	1	16

### 2.6.2 Principais PEs

Em relação à identificação das principais PEs existentes em empresas manufatureiras, o Quadro 6 apresenta as 14 PEs identificadas no PB de acordo com sua frequência de citação e aplicação nos níveis do fluxo de valor.

A PE que obteve a maior frequência de citação foi o *kanban* (14 citações). Segundo Kumar e Panneerselvam (2007), *kanban* é basicamente um sinal que contém as informações necessárias para a produção de um produto em todas as etapas de sua produção. A alta frequência de citação do *kanban* é justificada pela sua grande importância dentro dos sistemas produtivos. Além disso, indica que ele é uma PE altamente associada ao contexto de *smart factory* proposto pela I4.0 (vide KOTANI, 2007; KOURI, 2010; LAGE JUNIOR; FILHO, 2010; KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SANDERS *et al.*, 2016; SANDERS *et al.*, 2017). Esses trabalhos sugerem aplicações do *kanban* com novas tecnologias, visando obter melhorias e maximizar seus benefícios.

A segunda PE com maior número de citações identificada foi o *Value stream mapping* (VSM) ou mapeamento do fluxo de valor. A I4.0 busca oferecer à manufatura ganhos por meio da melhoria dos processos e eliminação do desperdício existentes. Dessa forma, o VSM desempenha um papel importante, visto que possibilita enxergar gargalos, desperdícios e pontos críticos existentes nos processos (ROTHER; SHOOK, 2003). Além disso, esta PE pode ser utilizada para identificar oportunidades de melhoria tanto no fluxo de material quanto no fluxo de informações (ABDULMALEK; RAJGOPAL, 2007). Desse modo, as tecnologias da I4.0 podem ser associadas com esta PE para obtenção de melhores resultados sistêmicos (KOLBERG; ZÜHLKE, 2015; SIBATROVA; VISHNEVSKIY, 2016; TORTORELLA; FETTERMANN, 2017).

Com relação às PEs com menor número de citações, *Total Productive Maintenance* (TPM) ou Manutenção Produtiva Total e *jidoka* ou autonomia obtiveram apenas três citações cada, o que de certa forma é um resultado contrário ao esperado. A I4.0 possui condições de fornecer um vasto número de dados e informações que podem ser utilizados no aprimoramento do desempenho de equipamentos, convergindo para os objetivos almejados a partir da implementação do TPM. Os poucos trabalhos relacionados ao tema, por exemplo, Yoon (2012) e Geng *et al.* (2014), sugerem a aplicação das tecnologias da I4.0 para o aperfeiçoamento da manutenção preditiva. Já Zhu *et al.* (2012) e Zhang (2015) propõem o uso das tecnologias relacionadas à I4.0 para auxiliar na manutenção, reparo e operação (MRO) de equipamentos complexos, como os empregados em fundição na indústria siderúrgica.

No tocante ao *jidoka* ou autonomia, esta PE junto com o JIT representam os pilares do Sistema Toyota de Produção (OHNO, 1988). Seu objetivo é garantir que anomalias sejam detectadas durante o processamento e não sejam enviadas para a próxima estação (RANKY *et al.*, 2007). A I4.0, por sua vez, propõe o uso de diversas tecnologias como robotização avançada e inteligência artificial, além de o uso de máquinas e equipamentos dotados de conceitos, como *machine learning* e *decision-making process* ou processo de tomada de decisão, que podem ser empregados para aperfeiçoar controles contra anormalidades (BAGHERI *et al.*, 2015). Assim, à medida que a I4.0 visa fornecer meios para detectar a ocorrência de anomalias, permitindo estabelecer maiores controles de qualidade e produtividade (SANDERS *et al.*, 2016), pode-se esperar que ambos (*jidoka* e I4.0) estejam fortemente alinhados (SANDERS *et al.*, 2017).

Apesar de as práticas ‘TPM’ e ‘autonomia’ apresentarem um potencial alinhamento com as tecnologias da I4.0, conforme evidências apresentadas, até o momento existe uma carência de trabalhos relacionando esses aspectos e suas possíveis sinergias. Nesse sentido, vale ressaltar que a baixa frequência de citação pode não estar ligada à falta de alinhamento entre estas, mas sim resultante de outros fatores. O TPM, por exemplo, caracteriza-se por ser um conjunto de atividades conectadas que visa atender a um objetivo comum. No entanto, até o momento, as aplicações da I4.0 apresentam um enfoque centrado em soluções pontuais, nas quais as tecnologias estão sendo aplicadas sem necessariamente estarem relacionadas com a implementação de processos de suporte ao TPM. Em relação ao *jidoka*, identificou-se que, inicialmente, as tecnologias que auxiliam na detecção de problemas estão sendo aplicadas para permitir a conectividade na manufatura. Dessa forma, alguns aspectos relacionados a questões de qualidade propostos pelo *jidoka* ainda não foram plenamente explorados.

Quadro 6 - Principais práticas enxutas

Código	Práticas Enxutas	Pesquisadores	Nível Intracelular	Nível Macro processos	Nível Cadeia de suprimentos	Estudo Teórico	Estudo Prático	Frequência
p <sub>1</sub>	<i>Kanban</i>	KOURI <i>et al.</i> (2010); BHAMU; SINGHK (2014); FLEISCH <i>et al.</i> (2015); KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); DAVE <i>et al.</i> (2016); MARTINEZ <i>et al.</i> (2016); MICIETA <i>et al.</i> (2016); ESMAEILIAN <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); KUSTERS <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017).		X	X	14		14
p <sub>2</sub>	<i>Value-stream mapping (VSM) ou Mapeamento do fluxo de valor</i>	KOURI <i>et al.</i> (2010); BHAMU; SINGHK (2014); FLEISCH <i>et al.</i> (2015); KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); DAVE <i>et al.</i> (2016); MARTINEZ <i>et al.</i> (2016); MICIETA <i>et al.</i> (2016); ESMAEILIAN <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); KUSTERS <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017).	X	X	X	11	1	12
p <sub>3</sub>	<i>Poka-yoke ou Sistemas à prova de erros</i>	BHAMU; SINGHK (2014); KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); KUSTERS <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017); WIECH <i>et al.</i> (2017).	X			8	1	9
p <sub>4</sub>	<i>Kaizen</i>	BHAMU; SINGHK (2014); MARTINEZ <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016 a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017).	X	X		9		9

$p_5$	<i>Pull production</i> ou Produção puxada	ESMAEILIAN <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); FERRERA <i>et al.</i> (2017); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); KUSTERS <i>et al.</i> (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017).	X	X	X	9		9
$p_6$	<i>Andon</i>	BHAMU; SINGHK (2014); KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); DAVE <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017).	X			8		8
$p_7$	<i>SMED</i> ou Troca rápida de ferramentas (TRF)	BHAMU; SINGHK (2014); MARTINEZ <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); KUSTERS <i>et al.</i> (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017).	X			7		7
$p_8$	<i>Standardization</i> ou Padronização	KOURI <i>et al.</i> (2010); BHAMU; SINGHK (2014); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017).	X	X		6		6
$p_9$	<i>Total quality management</i> (TQM) ou Gestão da qualidade total	KOURI <i>et al.</i> (2010); BHAMU; SINGHK (2014); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017).		X	X	6		6
$p_{10}$	<i>Takt time</i> ou Tempo takt	KOURI <i>et al.</i> (2010); BHAMU; SINGHK (2014); SALMI <i>et al.</i> (2015); AYDOS; FERREIRA (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2017).		X		4	1	5
$p_{11}$	<i>Heijunka</i> ou Nivelamento da produção	KOURI <i>et al.</i> (2010); BHAMU; SINGHK (2014); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017).		X	X	5		5
$p_{12}$	5S	BHAMU; SINGHK (2014); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a); TAMÁS <i>et al.</i> (2016b); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017).	X	X		5		5



$p_{13}$	<i>Jidoka</i> ou Autonomia	BHAMU; SINGHK (2014); SANDERS <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016a).	X			3		3
$p_{14}$	<i>Total productive maintenance</i> (TPM) ou Manutenção produtiva total	BHAMU; SINGHK (2014); SANDERS <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2017).	X	X		3		3

## 2.7 ANÁLISE DAS LENTES TEÓRICAS

### 2.7.1 Relação das tecnologias da I4.0 com os níveis do fluxo de valor

Nesta etapa busca-se analisar as nove tecnologias identificadas da I4.0 para classificá-las sob a lente teórica dos diferentes níveis do fluxo de valor e de acordo com suas aplicações evidenciadas no PB. Segundo Womack e Jones (1998), fluxo de valor é o conjunto de ações necessárias e presentes na fabricação de um produto, do recebimento da matéria-prima até a entrega do produto acabado nas mãos do cliente. Os níveis do fluxo de valor podem ser separados de diferentes maneiras.

Nesse sentido, para esta pesquisa a classificação foi feita em três diferentes níveis, conforme sugerido por Duggan (2012), a saber: (i) intracelular; (ii) macroprocessos (intercelular ou interdepartamental); e (iii) cadeia de suprimentos (fluxo de valor estendido). O nível intracelular trata das atividades realizadas dentro das células produtivas existentes no ambiente da manufatura. De modo geral, são atividades de cunho mais operacional executadas pelos setores produtivos da empresa. O nível de macroprocessos corresponde ao gerenciamento da empresa e de seus processos interdepartamentais. Este possui atividades relacionadas à interface entre os processos, fluxos de informação e materiais internos à empresa, tais como: planejamento e controle de produção, finanças, logística de materiais, entre outras. Finalmente, o nível da cadeia de suprimentos envolve todos os processos e fluxos que vão além dos limites da empresa, envolvendo fornecedores e clientes. Cabe destacar que tanto os fluxos de material quanto informação são contemplados em todos os níveis da análise de valor (KOZLENKOVA *et al.*, 2015).

O Quadro 7 apresenta em quais níveis do fluxo de valor as tecnologias da I4.0 e PEs estão sendo utilizadas, respectivamente, citando exemplos de suas aplicações. Com relação às principais tecnologias da I4.0, cinco delas apresentaram evidências de aplicações em todos os níveis do fluxo de valor, tais como: ‘ $t_1$  – IoT’, ‘ $t_2$  – CPS’, ‘ $t_4$  – Big Data’, ‘ $t_5$  – Integração horizontal e vertical’ e ‘ $t_8$  – Simulação’. Esse resultado demonstra que tais tecnologias possuem características mais versáteis podendo ser aplicadas em diferentes níveis. Além disso, elas estão relacionadas com a transmissão e troca de dados entre os três diferentes níveis. Vale ressaltar que as tecnologias IoT e CPS já haviam sido destacadas anteriormente como as que obtiveram as maiores frequências de citação respectivamente, o que reforça o potencial de aplicação delas no ambiente de manufatura.

Por outro lado, as tecnologias ‘ $t_3$  – Computação em nuvem’, ‘ $t_7$  – Realidade aumentada’ e ‘ $t_9$  – Manufatura aditiva’ tiveram aplicações mencionadas em dois níveis do fluxo de valor.

De fato, tais tecnologias possuem um foco de aplicação mais restrito. Computação em nuvem é geralmente empregada para dar suporte à coleta e processamento de dados. Realidade aumentada é aplicada, por exemplo, no treinamento de operadores e engenheiros de manutenção. Já a manufatura aditiva é um processo de fabricação específico que une materiais camada sobre camada para criar itens a partir de dados de modelos 3D. Esse fato mostra que estas são tecnologias que possuem flexibilidade para serem aplicadas em diferentes contextos, porém, em um menor grau quando comparadas com as tecnologias anteriores.

Por fim, a tecnologia ‘ $t_6$  – Robotização avançada’ foi a única citada em apenas um nível do fluxo de valor (intracelular), indicando que essa tecnologia possui aplicações mais específicas e direcionadas. O uso da robotização avançada possui aplicações de caráter mais operacional, sendo muitas vezes empregada na substituição de mão de obra humana (FREY; OSBORNE, 2017). Além disso, os robôs, conseguem operar em conjunto com máquinas e sistemas dotados de inteligência artificial em um ambiente semiestruturado (PFEIFFER, 2016). Segundo Rubmann (2015), a robotização vem sendo utilizada em atividades operacionais cada vez mais específicas e com alto nível de complexidade, mantendo-se restrita ao nível intracelular.

Quadro 7 - Aplicação das tecnologias I4.0 nos níveis do fluxo de valor

<b>Código</b>	<b>Tecnologia I4.0</b>	<b>Nível Intracelular</b>	<b>Nível Macroprocessos</b>	<b>Nível Cadeia de suprimentos</b>	<b>Exemplos de aplicação</b>
$t_1$	Internet das coisas (IoT)	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Auxiliar na execução de regulagens e <i>setup</i> na estação de trabalho;</li> <li>-Monitorar a qualidade por meio do registro de informações;</li> <li>-Administrar a movimentação de robôs para a coleta e transporte de materiais;</li> <li>-Controlar estoques e rastreabilidade de materiais;</li> <li>-Compartilhar dados com a rede para otimizar a manutenção preventiva;</li> <li>-Usar a automação para otimizar indicadores chaves;</li> <li>-Disponibilizar informações em tempo real para auxiliar a tomada de decisão pela gerência;</li> <li>-Gerenciar remotamente a fábrica em tempo real; e</li> <li>-Compartilhar dados dentro da cadeia logística global em todas as fases do MFV.</li> </ul>
$t_2$	Sistemas ciber-físicos (CPS)	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alterar programação de produção;</li> <li>-Corrigir falhas por meio de sistemas interligados;</li> <li>-Empregar sistemas de fabricação de auto-otimização com foco no zero defeito;</li> <li>-Disponibilizar informações em tempo real para otimizar a tomada de decisão pela gerência;</li> <li>-Compartilhar dados com a rede para otimizar manutenção preventiva;</li> <li>-Garantir a segurança dos processos;</li> <li>-Melhorar a eficiência de equipamentos; e</li> <li>-Aumentar a rapidez na tomada de decisão.</li> </ul>
$t_3$	Computação em nuvem		X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Integrar e compartilhar informações com os diferentes setores da fábrica;</li> <li>-Gerenciar remotamente a manutenção (MRO) de equipamentos complexos;</li> <li>-Economizar espaço com o armazenamento de dados;</li> <li>-Armazenar e compartilhar dados entre diferentes empresas (<i>data warehouse</i>);</li> <li>-Compartilhar dados e informações da empresa com o público interno e externo;</li> <li>-Estabelecer comunicação entre os sistemas ERP de diferentes empresas;</li> <li>-Incrementar a produtividade devido à facilidade para se armazenar e dividir documentos;</li> <li>-Aumentar a segurança para armazenar e recuperar informações; e</li> <li>-Otimizar sistemas de gerenciamento de relacionamento de clientes (CRM).</li> </ul>

$t_4$	Big Data	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Gerenciar dados para otimizar a manutenção de equipamentos complexos;</li> <li>-Reduzir tempo para tomar decisões baseadas no histórico;</li> <li>-Reduzir custos com armazenagem de dados;</li> <li>-Auxiliar na criação de novos produtos baseado no gerenciamento de relacionamento de clientes (CRM) e suas preferências;</li> <li>-Executar análises de mercado; e</li> <li>-Monitorar grau de satisfação da empresa com os clientes.</li> </ul>
$t_5$	Integração horizontal e vertical	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Integrar diferentes setores da empresa como engenharia e produção;</li> <li>-Integrar sistemas de tecnologia da informação no nível horizontal e vertical para obter ganhos em produtividade, custo e qualidade; e</li> <li>-Compartilhar dados dentro de toda a cadeia de fluxo de valor.</li> </ul>
$t_6$	Robotização avançada	X			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Executar tarefas complexas com alta acuracidade;</li> <li>-Eliminar erros na liberação de produtos;</li> <li>-Eliminar erros de estocagem;</li> <li>-Testar e inspecionar produtos acabados;</li> <li>-Executar montagens de alta precisão (montar micro-dispositivos em microchips); e</li> <li>-Executar tarefas em colaboração com seres humanos (robôs colaborativos).</li> </ul>
$t_7$	Realidade aumentada	X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Resolução de problemas no posto de trabalho por meio do uso de dispositivos como <i>tablet</i>, <i>smartglasses</i> ou <i>smartphones</i>; e</li> <li>-Auxiliar na execução da manutenção remotamente pelo compartilhamento do conhecimento e orientação técnica.</li> </ul>
$t_8$	Simulação	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Auxiliar operadores a realizar tarefas complexas;</li> <li>-Executar treinamento operacional;</li> <li>-Simular projetos e processos;</li> <li>-Simular diferentes cenários de produção e programação; e</li> <li>-Analisar gargalos na produção.</li> </ul>
$t_9$	Manufatura aditiva	X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Minimizar o impacto de alterações em projetos;</li> <li>-Otimizar processos produtivos como usinagem e soldagem;</li> <li>-Facilitar a construção de protótipos e amostras; e</li> <li>-Reparar componentes danificados.</li> </ul>

### 2.7.2 Grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e as PEs

Nesta parte da pesquisa, buscou-se identificar a relação entre a associação das principais tecnologias da I4.0 e PEs existentes na literatura. Desse modo, foram extraídas evidências existentes no PB com o objetivo de estabelecer relações e analisar o desempenho de suas sinergias. Foi considerado pelo presente trabalho que o grau de sinergia é o nível de interação ou cooperação entre um determinado par, formado por uma tecnologia I4.0 e uma PE capaz de produzir um efeito maior do que a soma de seus efeitos de forma separada.

Para isso, foi construído uma matriz de interação, contendo as nove tecnologias da I4.0 e as 14 PEs, conforme mostra o Quadro 8. O objetivo da matriz de interação é auxiliar a identificação do grau de sinergia ou dissonância existente em cada uma das 126 associações estabelecidas. Três critérios foram levados em consideração para definir o grau de sinergia entre as associações a saber: (i) frequência de citação das tecnologias da I4.0 e PEs (Quadros 5 e 6); (ii) aplicação das tecnologias e PEs nos diferentes níveis do fluxo de valor (Quadros 6 e 7); e (iii) relevância das evidências encontradas na literatura. Para o primeiro critério, tanto as tecnologias quanto as PEs foram categorizadas em três faixas de frequência de citação dentro dos seus respectivos grupos. O grupo denominado como ‘alta citação’ representa aproximadamente 33,33% das mais citadas práticas ( $p_1, p_2, p_3, p_4$  e  $p_5$ ) e tecnologias ( $t_1, t_2$  e  $t_3$ ). Por sua vez, o grupo com 33,33% das práticas ( $p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}$  e  $p_{14}$ ) e tecnologias ( $t_7, t_8$  e  $t_9$ ) com a menor frequência de citação foi definido como ‘baixa citação’. O restante das práticas ( $p_6, p_7, p_8$  e  $p_9$ ) e tecnologias ( $t_4, t_5$  e  $t_6$ ) foram categorizadas como ‘média citação’. Dessa forma, escores de 3, 2 e 1 foram associados às categorias de ‘alta citação’, ‘média citação’ e ‘baixa citação’, respectivamente.

Para o segundo critério, cruzamentos entre PEs e tecnologias que apresentam aplicações exatamente nos mesmos níveis do fluxo de valor foram considerados ‘altamente’ relacionados. Em contrapartida, para aqueles em que não há aplicação em um mesmo nível, foram definidos como não relacionados. Para associações nas quais as tecnologias e as PEs são concomitantemente aplicadas em pelo menos um dos níveis do fluxo de valor, considerou-se relacionamento de nível intermediário. De maneira análoga, cada categoria recebeu um escore associado da seguinte forma: 3 (alto), 2 (médio) e 1 (baixo).

Por fim, o terceiro critério compreende uma análise qualitativa das evidências encontradas no PB. Tais evidências foram analisadas quanto à relevância e robustez das inferências realizadas ao longo dos artigos. Nesse sentido, relacionamentos entre PEs e tecnologias que foram comprovados com base em procedimentos metodológicos mais

consistentes, foram definidos como de alto nível. Consequentemente, os relacionamentos de nível médio e baixo foram atribuídos às evidências baseadas em estudos cuja abordagem apresenta média ou baixa consistência metodológica. Escores 3, 2 e 1 foram atribuídos para relacionamentos de alto, médio e baixo nível, respectivamente.

Assim, a classificação do grau de sinergia dos 126 pares de relações foi baseada na soma das avaliações de cada um dos critérios descritos, sendo definida em três diferentes níveis: baixo (relacionamentos cuja soma das avaliações dos critérios é 3 ou 4); médio (associações cujos escores somam valores de 5, 6 ou 7); e alto grau de sinergia (relacionamentos cuja soma totaliza um escore de 8 ou 9). Desse modo, identificou-se que 24 (19%) delas foram classificadas de alta sinergia, 72 (57%) de média sinergia e, por fim, 30 (24%) de baixa sinergia. As interações classificadas com o alto grau de sinergia revelam a existência de uma relação favorável e de colaboração entre os dois componentes (PE e tecnologia) para se alcançar um melhor desempenho operacional. Nesse tipo de interação existe uma grande probabilidade de a tecnologia e a PE funcionarem de uma forma construtiva para a melhoria dos resultados, como é o caso da interação entre o CPS e o VSM. Tanto CPS e o VSM possuem uma alta disseminação em todo o fluxo de valor, sendo usados como uma tecnologia/prática suporte pela qual outras tecnologias/práticas podem se beneficiar. Nesse sentido, como uma aplicação adequada do VSM requer uma grande quantidade de informação (BHAMU; SINGHK 2014) a qual, quase sempre está desatualizada e não pode ser estocada (TAMÁS; ILLÉS 2016), o emprego do CPS pode prover informações com maior acuracidade, logo decisões gerenciais que priorizam iniciativas de melhorias contínuas poderiam ser baseadas em cenários mais realistas.

Para relacionamentos de médio grau de sinergia, presume-se que as tecnologias e as práticas são compatíveis em determinados aspectos. Nesse sentido, ocasionalmente, algumas adaptações precisam ser feitas para que a associação seja bem-sucedida. Desse modo, o emprego dessa associação requer uma análise mais detalhada das características particulares de cada par de tecnologia e PE, assim como do contexto inserido. Um exemplo disso é a relação entre a tecnologia de simulação e a PE sistema a prova de erros, a qual depende fortemente do contexto de aplicação. Embora a utilização da simulação possa antecipar potenciais dificuldades e mitigar falhas em um processo produtivo (ADEYERI *et al.*, 2015), na verdade não evita erros, que é a essência do *poka-yoke* (KOLBERG; ZÜEHLKE, 2015). Nesse sentido, uma certa complementaridade entre simulação e *poka-yoke* é claramente identificada, ainda que estudos que relatam suas aplicações de modo concomitante ainda sejam escassos.

Relacionamentos de baixo grau de sinergia indicam que, provavelmente, algumas características dos componentes precisam sofrer modificações significativas para tornar a associação viável. Nesse sentido, o emprego dessa associação carece de uma análise mais aprofundada para ser justificada e para que os resultados desejados possam ser alcançados. Tal situação pode ser observada na relação entre a tecnologia robotização avançada e a PE TRF, cuja associação, se não for bem planejada, pode gerar esforços conflitantes para a melhoria operacional das empresas manufatureiras (PFEIFFER, 2016). Por um lado, a utilização da robotização avançada pode suportar atividades complexas (MOURTZIS, *et al.*, 2017b), que geralmente são encontradas em uma regulagem de máquina. Por outro lado, altos níveis de robotização e automação podem deixar as linhas de produção menos flexíveis (SANDERS *et al.*, 2017), limitando o alcance de uma família de produtos processados nessa linha e tornando as regulagens de máquinas muito demoradas. No geral, esta é uma observação relevante, uma vez que pode haver relações que ainda precisam ser exploradas para que essa interação possa ser desenvolvida de modo a permitir a superação de funcionalidades tecnológicas e práticas que possam acarretar resultados diferentes.

Com relação às tecnologias que apresentaram o maior número de interações de alta sinergia (pontuação entre 8 ou 9), IoT e CPS (ambas com 6 interações), foram as que se destacaram. A IoT e o CPS exercem um papel-chave na troca e transmissão de dados necessárias para conectar a manufatura com as PEs (BAGHERI *et al.*, 2015; RAD *et al.*, 2015; HERMANN *et al.*, 2016), o que está alinhado com certos princípios enxutos propostos por Liker e Franz (2011), como "fomentar uma cultura para parar e corrigir problemas" e "estabelecimento do fluxo contínuo para levantar e identificar problemas". Tais princípios são amplamente operacionalizados por PEs como o *kaizen*, *poka-yoke* e *kanban*, as quais são consideradas como altamente sinérgicas com as tecnologias IoT e CPS, conforme mostra o Quadro 8. Além disso, ambas as tecnologias possuem alta flexibilidade, podendo ser aplicadas de diversas formas e para diferentes finalidades (TAMÁS *et al.*, 2016; XU; CHEN, 2016), possibilitando o atingimento de altos níveis de qualidade e produtividade pelo facilitamento da interconectividade entre processos produtivos.

Por outro lado, dentre as tecnologias que apresentaram maior número de relacionamentos de baixa sinergia (pontuação entre 3 ou 4), destaca-se a 'robotização avançada' (7 interações). A robotização foi aplicada com sucesso na manufatura onde apresentou importantes ganhos em produtividade (SHUKLA; KARKI, 2016). Contudo, sua aplicação ocorreu em um contexto onde as tecnologias da I4.0, tais como IoT, CPS e Computação em nuvem ainda não estavam disponíveis. A partir do surgimento das tecnologias da I4.0 as empresas passam a ter a sua



disposição um maior número de alternativas capazes de gerar ganhos de produtividade. Nesse sentido, conforme sugerem os resultados encontrados, as organizações devem analisar a aplicação de outras tecnologias que apresentaram um maior grau de sinergia com as PEs antes da optar pela robotização. Além disso, cabe ressaltar que a baixa sinergia apontada pelo Quadro 8 pode estar relacionada ao fato de essa tecnologia ter uma maior probabilidade de ser utilizada em processos de chão de fábrica (nível intracelular). Portanto, quando comparada a tecnologias cuja aplicação pode ser estendida em diferentes níveis do fluxo de valor, a robotização avançada fornece pouco suporte às PEs que visam processos macro e/ou níveis de cadeia de suprimentos, como *kanban* e *heijunka*.

Quanto às PEs que obtiveram o maior número de interações de alta sinergia, identificou-se que o ‘mapeamento do fluxo de valor’ obteve o melhor desempenho (6 interações). O bom resultado dessa prática está relacionado a diversos fatores, entre eles pode-se destacar o fato de o VSM abranger todos os níveis do fluxo de valor, ser eficiente no combate frente aos desperdícios e estar bem difundido no ambiente de manufatura (ROTHER; SHOOK, 2003) em serviços e em organizações em geral (SHIH *et al.*, 2016). Portanto, essa prática é considerada potencialmente benéfica para a adoção da I4.0 (KOLBERG; ZÜEHLKE, 2015), pois proporciona uma abordagem estruturada para analisar oportunidades de melhoria e orientar as organizações para uma operação mais enxuta. Conforme mencionado anteriormente, um VSM digitalmente integrado com dados em tempo real permite uma compreensão mais aprofundada do *status quo* das empresas e de um *design* mais assertivo para fluxos de valor enxutos.

Por fim, referente as PEs que obtiveram grande número de interações com baixo grau de sinergia pode-se citar ‘tempo *takt*’ e o ‘5S’. O tempo *takt* tem como um de seus maiores objetivos alinhar com precisão o ritmo do sistema produtivo com a demanda do mercado (ROTHER; SHOOK, 2003). Além disso, o tempo *takt* é baseado em uma demanda previsível e apresenta dificuldades para absorver flutuações de demanda (ALI; DEIF, 2014). A I4.0, por sua vez, permite que o sistema de produção seja modular e flexível, capacitando-o a produzir em massa produtos altamente customizados (KAGERMANN *et al.*, 2013). Nesse sentido, pode-se dizer que o tempo *takt* é de certa forma, contraditório aos princípios da descentralização e autonomia pregados pela adoção das tecnologias da I4.0 (SANDERS *et al.*, 2017). O 5S se constitui em um dos principais pilares da ME sendo inclusive citada por diversos pesquisadores como a base para a melhoria contínua e para a criação de uma cultura organizacional (OHNO, 1998; PIL; FUJIMOTO, 2007; KUMAR *et al.*, 2006; JIMÉNEZ *et al.*, 2015). A importância dessa PE reside no fato de ela poder ajudar a reduzir custos, melhorar a eficiência e o desempenho dos processos por meio da criação e manutenção de um ambiente de trabalho limpo

e de qualidade (HO, 1999; LIKER, 2004; LIKER; HOSEUS, 2008). Por ser uma PE fácil de ser aplicada ela se encontra bem disseminada nos ambientes manufatureiros estando presente em todos os níveis do fluxo de valor. No entanto, identificou-se que até o momento ainda não existem muitas pesquisas relacionando seu emprego com as tecnologias da I4.0. Como consequência disso, o 5S obteve uma baixa pontuação nos critérios relacionados a frequência de citação e relevância das evidências encontradas na literatura, o que também ocasionou uma baixa pontuação no seu grau de sinergia.

Quadro 8 - Matriz de interação entre as principais tecnologias da I4.0 e PE

		Tecnologias da Indústria 4.0																																				
		IoT				CPS				Computação em nuvem				Big Data				Integração horizontal e vertical				Robotização avançada				Realidade aumentada				Simulação				Manufatura aditiva				
		t <sub>1</sub>				t <sub>2</sub>				t <sub>3</sub>				t <sub>4</sub>				t <sub>5</sub>				t <sub>6</sub>				t <sub>7</sub>				t <sub>8</sub>				t <sub>9</sub>				
		(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)	
Práticas enxutas	Kanban	p <sub>1</sub>	3	2	3	8	3	2	3	8	3	2	3	8	3	2	3	8	3	2	3	8	2	1	1	4	2	2	1	5	2	2	1	5	2	2	2	6
	VSM	p <sub>2</sub>	3	3	3	9	3	3	3	9	3	2	3	8	3	3	3	9	3	3	2	8	3	2	1	6	2	2	2	6	2	3	3	8	2	2	2	6
	Sistemas à prova de erros	p <sub>3</sub>	3	2	3	8	3	2	3	8	3	2	3	8	3	2	2	7	3	2	1	6	3	1	2	6	2	2	2	6	2	2	2	6	2	2	1	5
	Kaizen	p <sub>4</sub>	3	3	3	9	3	3	3	9	3	2	3	8	3	3	3	9	3	3	2	8	3	2	2	7	2	2	2	6	2	3	2	7	2	2	1	5
	Produção puxada	p <sub>5</sub>	3	2	3	8	3	2	3	8	3	2	2	7	3	2	1	6	3	2	2	7	2	1	1	4	2	2	1	5	2	2	1	5	2	2	1	5
	Andon	p <sub>6</sub>	3	2	2	7	3	2	2	7	3	2	3	8	2	2	1	5	2	2	1	5	2	1	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4
	TRF	p <sub>7</sub>	3	2	1	6	3	2	1	6	3	1	2	6	2	2	2	6	2	2	1	5	2	2	2	6	2	2	2	6	1	2	1	4	2	2	2	6
	Padronização	p <sub>8</sub>	3	3	1	7	3	3	1	7	3	2	1	6	2	3	1	6	2	3	1	6	2	2	1	5	1	2	1	4	2	3	1	6	1	2	1	4
	GQT	p <sub>9</sub>	3	3	2	8	3	3	2	8	3	2	2	7	2	3	1	6	2	3	1	6	2	2	1	5	1	2	1	4	2	3	2	7	2	2	2	6
	Tempo takt	p <sub>10</sub>	2	2	1	5	2	2	1	5	2	2	1	5	1	2	1	4	1	2	1	4	1	1	1	3	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4
	Nivelamento da produção	p <sub>11</sub>	2	2	3	7	2	2	1	5	2	2	1	5	1	2	1	4	1	2	1	4	1	1	1	3	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	2	5
	5S	p <sub>12</sub>	2	3	1	6	2	3	1	6	2	2	1	5	2	3	1	6	2	3	1	6	1	2	1	4	1	2	1	4	1	3	1	5	1	2	1	4
	Autonomação	p <sub>13</sub>	2	2	2	6	2	2	3	7	2	1	2	5	2	2	2	6	1	2	1	4	2	2	3	7	1	2	3	6	1	2	1	4	1	2	1	4
	TPM	p <sub>14</sub>	2	2	3	7	2	2	3	7	2	2	3	7	2	2	3	7	2	2	2	6	1	2	1	4	1	2	2	5	1	2	1	4	1	2	1	4

(3 - 4) Baixo grau de sinergia

(5 - 7) Médio grau de sinergia

(8 - 9) Alto grau de sinergia

Notas: (a) Frequência de citação das tecnologias da I4.0 e PE; (b) Aplicação das tecnologias da I4.0 e PEs em diferentes níveis do fluxo; (c) Relevância das evidências encontradas na literatura; e (d) Total da pontuação baseado na soma dos critérios (a), (b) e (c).

## 2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DIRECIONAMENTOS PARA FUTURAS PESQUISAS

O presente trabalho procurou identificar as principais tecnologias da I4.0 e PEs existentes em empresas manufatureiras, e examinar o grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e PEs. Para alcançar tal objetivo, realizou-se um levantamento sistemático da literatura, identificando-se um portfólio final com 93 artigos, de modo a apresentar um panorama sobre o presente tema.

Cabe destacar que esta pesquisa contemplou somente trabalhos que abordavam concomitantemente os temas tecnologias da I4.0 e PEs. Sendo possível se constatar uma carência de trabalhos relacionando ambos os temas. Nesse sentido, este estudo contribui para o fortalecimento do corpo de conhecimento sobre as tecnologias da I4.0 e PEs, pontuando suas características e aplicações em diferentes níveis do fluxo de valor, e identificando sinergias entre elas (contribuição teórica). Embora nossas descobertas sejam limitadas a proposições conceituais/teóricas, elas podem ser usadas como diretrizes iniciais para se integrar as novas tecnologias da I4.0 com as PEs, sugerindo uma expectativa com relação ao nível de sinergia entre elas e permitindo a priorização de sua implementação.

Com relação às contribuições práticas, os resultados indicam que as empresas que estão passando por uma implementação em ME e que desejam se beneficiar da I4.0, devem de preferência investir seus esforços na adoção de tecnologias como o IoT e CPS, visto que essas tecnologias são as que possuem o maior número de relacionamentos de alta sinergia com as PEs e, portanto, são as mais prováveis para fornecer resultados de curto prazo. Já de modo contrário, a robotização avançada não deve ser priorizada devido ao seu nível limitado de sinergia com as PEs. Outras tecnologias cuja conceituação e aplicação ocorreram antes do surgimento formal da I4.0, como a simulação, podem ter perdido sua novidade, reduzindo seu interesse de pesquisa. Por outro lado, esse fato não significa que a simulação seja aplicada extensivamente na manufatura, uma vez que pode haver diferentes formas de utilizá-la em sistemas de produção e processos de fabricação que possam convergir para os objetivos da ME.

Baseado nos resultados deste trabalho, algumas oportunidades para futuras pesquisas foram identificadas, sendo as seguintes:

- a) Validação empírica das sinergias entre as tecnologias da I4.0 e PEs propostas: Como o presente estudo se baseou na proposição de níveis de intensidade de sinergia a partir de uma revisão sistemática de literatura, uma validação empírica dessas relações ainda precisa ser realizada. Tal análise poderia verdadeiramente verificar a existência dessas sinergias e quantificar melhor seus níveis de intensidade. Portanto,

estudos que conduzam uma pesquisa *survey*, realizada em diferentes setores, poderiam sustentar as proposições e fornecer argumentos mais robustos sobre tais relações;

- b) Categorização das tecnologias I4.0 e PEs nos diferentes níveis de fluxo de valor: Diferentemente da literatura sobre ME, o corpo de conhecimento sobre a I4.0 é significativamente mais recente e ainda incipiente. Tal fato indica que muito ainda precisa ser investigado e explorado para se tenha um entendimento mais claro dos benefícios potenciais oferecidos pela I4.0. Portanto, a categorização das tecnologias e aplicação das PEs de acordo com o nível do fluxo de valor pode ser aprimorada à medida que as empresas e pesquisadores evoluam no nível de compreensão. Futuros estudos com I4.0 e a ME poderiam melhor esclarecer e indicar como essa relação pode impactar as organizações como um todo, distinguindo seus efeitos nos diferentes níveis do fluxo de valor (intracelular, macroprocessos e cadeia de suprimentos);
- c) Analisar a implementação em I4.0 e a ME em diferentes contextos: Esta pesquisa identificou uma pequena quantidade de estudos relacionados a implementação da I4.0 ou ME de uma forma isolada nos ambientes de manufatura. Dado que a combinação de I4.0 com a ME é positiva e pode proporcionar melhorias (KOLBERG; ZÜEHLKE, 2015), e que a aplicação das tecnologias da I4.0 criará possibilidades para a resolução de problemas, bem como a melhoria dos processos produtivos atuais (GUBÁN; KOVÁCS, 2017). Sugere-se que outros estudos relacionados à implementação da I4.0 e ME sejam realizados em diferentes segmentos da manufatura e de uma forma conjunta. Tal aplicação poderia contribuir de modo significativo para um melhor entendimento sobre como se ocorre a integração em I4.0 e ME.

Uma limitação deste trabalho é fato de a busca ter sido feita somente com trabalhos que abordavam concomitantemente os temas tecnologias da I4.0 e PEs, podendo haver tecnologias ou PEs que foram abordadas apenas em estudos específicos de I4.0 ou ME. Portanto, reconhece-se que os conjuntos de tecnologia em I4.0 e PE incluídos nesta pesquisa não cobrem todas as existentes. De fato, essa pesquisa está restrita a essa evidência e relações adicionais podem ser identificadas se considerarmos outras tecnologias da I4.0 e PEs, relatadas individualmente na literatura. Outra limitação está relacionada à identificação dos graus de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e PEs, em que três critérios foram adotados para determinar se a relação entre os pares era sinérgica ou não. Os critérios propostos por este estudo não consideram os

fatores contextuais de qualquer empresa que possam influenciar tais relacionamentos. Nesse sentido, pesquisas adicionais poderiam investigar como tais fatores contextuais influenciam essas relações, além de complementar este estudo, indicando critérios que permitem avaliar a sinergia entre as duas abordagens.

## REFERÊNCIAS

- ABDULMALEK, F. A.; RAJGOPAL, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. **International Journal of Production Economics**, v.107, n. 1, p. 223-236, 2007.
- ADEYERI, M. K.; MPOFU, K.; OLUKOREDE, T. A. Integration of agent technology into manufacturing enterprise: A review and platform for industry 4.0. In: **Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), 2015 International Conference**, p. 1-10, 2015.
- ALIAS, C.; SALEWSKI, U.; RUIZ, V. E. O.; OLALLA, F. E. A.; REYMÃO, J. D. E. N.; NOCHE, B. Adapting Warehouse Management Systems to the Requirements of the Evolving Era of Industry 4.0. **Proceedings 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference**, p.1-14, 2017.
- ALMADA-LOBO, F. The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES). **Journal of Innovation Management**, v. 3, n. 4, p. 16-21, 2016.
- ANG, J. H.; GOH, C.; LI, Y. Smart design for ships in a smart product through-life and industry 4.0 environment. **Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on**, p. 5301-5308, 2016.
- ALI, R. M.; DEIF, A. M. Dynamic lean assessment for takt time implementation. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 577-581, 2014.
- ARNOLD, C.; KIEL, D.; VOIGT, K. I. How the industrial internet of things changes business models in different manufacturing industries. **International Journal of Innovation Management**, v. 20, n. 8, p. 1640015, 2016.
- AUGUSTO, Byanca Pinheiro. **Proposta de metodologia de avaliação da implementação de práticas enxutas em serviços da saúde**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- AYDOS, T. F.; FERREIRA, J. C. RFID-based system for lean manufacturing in the context of internet of things. **Automation Science and Engineering International Conference**, p. 1140-1145, 2016.
- BADURDEEN, F.; MARKSBERRY, P.; HALL, A.; GREGORY, B. Teaching lean manufacturing with simulations and games: A survey and future directions. **Simulation & Gaming**, v. 41, n. 4, p. 465-486, 2010.
- BAGHERI, B.; YANG, S.; KAO, H. A.; LEE, J. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. **IFAC-Papers Online**, v. 48, n. 3, p. 1622-1627, 2015.
- BALLARD, G., TOMMELEIN, I., KOSKELA, L. AND HOWELL, G. Lean construction tools and techniques. In: **Design and Construction: Building in Value**, p. 227-255. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

BASSI, L. Industry 4.0: Hope, hype or revolution? **Research and Technologies for Society and Industry**, p. 1-6, 2017.

BHAMU J.; SINGHK. Lean manufacturing: literature review and research issues. **International Journal of Operations Product Management**, v. 34, n. 7, p. 876-940, 2014.

BOHÁCS, G.; FRIKKER, I.; KOVÁCS, G. Intermodal logistics processes supported by electronic freight and warehouse exchanges. **Transport and telecommunication**, v. 14, n. 3, p. 206-213, 2013.

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**. Belo Horizonte, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.

BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.

BRETTEL, M.; KLEIN, M.; FRIEDERICHSEN, N. The relevance of manufacturing flexibility in the context of Industrie 4.0. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 105-110, 2016.

BROY, M.; CENGARLE, M.V.; GEISBERGER, E. **Cyber-physical systems: imminent challenges**, Monterey Workshop, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 1-28, 2012.

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

BURCH, V. R. F.; SMITH, B. Using simulation to teach lean methodologies and the benefits for millennials. **Total Quality Management & Business Excellence**, p. 1-15, 2017.

BUTZER, S.; KEMP, D.; STEINHILPER, R.; SCHOTZ, S. Identification of approaches for remanufacturing 4.0. In: **European Technology and Engineering Management Summit**, p. 1-6, 2016.

CHEN, J. Y.; TAI, K. C.; CHEN, G. C. Application of Programmable Logic Controller to Build-up an Intelligent Industry 4.0 Platform. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 150-155, 2017.

CHIANG, Y.; LEE, D. Smart manufacturing with the Internet of makers. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, v. 40, n. 7, p. 585-592, 2017.

CHROMJAKOVÁ, F.; BOBÁK, R.; HRUSECKA, D. Production process stability–core assumption of industry 4.0 concept. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 215, n. 1, p. 012024, 2017.

CNI, BRAZIL'S NATIONAL CONFEDERATION OF INDUSTRY, Industry 4.0: a new challenge for Brazilian industry, **CNI Indicators**, v. 17, n. 2, 2016.

COLLIS, J.; HUSSEY, R. **Pesquisa em Administração: um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.



CONGER, S.; MILLER, R. Problem-based learning for a lean six sigma course. **University of Dallas, USA. Sprouts: Working Papers on Information Systems**, v. 13, n. 1, 2013.

DAVE, B.; KUBLER, S.; FRÄMLING, K.; KOSKELA, L. Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards. **Automation in construction**, v. 61, p. 86-97, 2016.

DEMO, P. Pesquisa e construção de conhecimento: metodologia científica no caminho de Habermas. **Tempo Brasileiro**, Rio de Janeiro, 2009.

DENNIS, Pascal. **Produção Lean simplificada**: Um guia para entender o sistema de produção mais poderoso do mundo. São Paulo: Bookman, 2008.

DICKMANN, P. **Schlanker Materialfluss: mit Lean Production, Kanban und Innovationen**. Springer-Verlag, 2008.

DOH, S. W.; DESCHAMPS, F.; DE LIMA, E. P. Systems integration in the lean manufacturing systems value chain to meet industry 4.0 requirements. In: **ISPE TE**, p. 642-650, 2016.

DOMBROWSKI, U.; RICHTER, T.; KRENKEL, P. Interdependencies of industrie 4.0 & lean production systems: A use cases analysis. **Proceedings of 27<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing**, v. 11, p. 1061-1068, 2017.

DUGENSKE, A.; LOUCHEZ, A. The factory of the future will be shaped by the Internet of things. **Manufacturing Net**, v. 19, 2014.

DUGGAN, K. J. **Creating mixed model value streams: practical lean techniques for building to demand**. CRC Press, 2012.

EBSCO. **Pesquisas com operadores booleanos**. Disponível em: [https://help.ebsco.com/interfaces/EBSCOhost/MultilingualFAQs/Pesquisa\\_com\\_Operadores\\_Booleanos](https://help.ebsco.com/interfaces/EBSCOhost/MultilingualFAQs/Pesquisa_com_Operadores_Booleanos). Acesso em: 12 fev. 2018.

EDWARDS, P.; RAMIREZ, P. When should workers embrace or resist new technology? **New technology, work and employment**, v. 31, v. 2, p. 99-113, 2016.

ELEFTHERIADIS, M. S. R. J.; MYKLEBUST, O. A guideline of quality steps towards zero defect manufacturing in Industry. In: **2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**, 2016.

ERLACH, K. **Value stream design: The way towards a lean factory**, Berlin, New York, Springer, 2013.

EROL, S.; JAGER, A.; HOLD, P.; OTT, K.; SIHN, W. Tangible industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. **Proceedings of 6<sup>th</sup> Conference on Learning Factories**, v. 54, p. 13-18, 2016.

- ESMAEILIAN, B.; BEHDAD, S.; WANG, B. The evolution and future of manufacturing: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 39, p. 79-100, 2016.
- FAÉ, C. S.; RIBEIRO, J. L. D. Um retrato da engenharia de produção no Brasil. **Revista Gestão Industrial**, v. 1, n. 3, 2005.
- FELDER, R. M.; SPURLIN, J. Applications, reliability and validity of the index of learning styles. **International journal of engineering education**, v. 21, n. 1, p. 103-112, 2005.
- FERA, M.; MACCHIAROLI, R.; FRUGGIERO, F.; LAMBIASE, A.; MIRANDA, S. Application of a business process model (BPM) method for a warehouse RFID system implementation. **International Journal of RF Technologies**, v. 8, n. 1-2, p. 57-77, 2017.
- FERENHOF, H. A.; R.F. FERNANDES. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SSF. Revista ACB: **Biblioteconomia em Santa Catarina**, v. 21, n. 3, p. 550-563, 2016.
- FERRERA, E.; ROSSINI, R.; BAPTISTA, A. J.; EVANS, S.; HOVEST, G. G.; HOLGADO, M.; LEZAK, E.; LOURENÇO, E. J.; MASLUSZCZAK, Z.; SCHNEIDER, A.; SILVA, E. J.; WERNER-KYTOLA, O. Toward industry 4.0: Efficient and sustainable manufacturing leveraging maestri total efficiency framework. **International Conference on Sustainable Design and Manufacturing**, p. 624-633, 2017.
- FETTERMANN, D. C.; CAVALCANTE, C. G. S.; ALMEIDA, T. D. D.; TORTORELLA, G. L. How does Industry 4.0 contribute to operations management?. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 35, n. 4, p. 255-268, 2018.
- FEUBER, H.; PARK, A. Surgery 4.0: The natural culmination of the industrial revolution?. **Innovative Surgical Sciences**, v. 2, n. 3, p. 105-108, 2017.
- FLEISCH, E.; WEINBERGER, M.; WORTMANN, F. Business models and the internet of things. In: **Interoperability and Open-Source Solutions for the Internet of Things**, p. 6-10, 2015.
- FREY, C. B.; OSBORNE, M. A. The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation?. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 114, p. 254-280, 2017.
- PIL, F. K.; FUJIMOTO, T. Lean and reflective production: the dynamic nature of production models. **International journal of production research**, v. 45, n. 16, p. 3741-3761, 2007.
- FULLERTON, R. R.; WATTERS, M.C. The production performance benefits from JIT Implementation. **A Journal of Operations Management**, v. 19, p. 81-86, 2001.
- GAO, S.; LOW, S. P. The Toyota Way model: an alternative framework for lean construction. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 25, n. 5-6, p. 664-682, 2014.
- GAO, Q.; SHI, R.; WANG, G. Construction of intelligent manufacturing workshop based on lean management. **Procedia CIRP**, v. 56, p. 599-603, 2016.

GENG, J.; TIAN, X.; BAI, M.; JIA, X.; LIU, X. A design method for three-dimensional maintenance, repair and overhaul job card of complex products. **Computers in Industry**, v. 65, n. 1, p. 200-209, 2014.

GETTY, L. Ergonomics and the customer satisfaction model: ergonomics in the language of business. **Proc HumFactors Ergon Soc Meet** v. 43, n. 14, p. 815–819, 1999.

GIAIMO, F.; YIN, H.; BERGER, C.; CRNKOVIC, I. Continuous experimentation on cyber-physical systems: challenges and opportunities. **Proceedings of the Scientific Workshop Proceedings of XP 2016**, p. 14, 2016.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. Atlas, São Paulo, 2010.

GJELDUM, N.; MLADINEO, M.; VEZA, I. Transfer of model of innovative smart factory to Croatian economy using Lean Learning Factory. *Procedia CIRP*, v. 54, p. 158, 2016.

GLIGOR, D. M.; HOLCOMB, M. C. Understanding the Role of Logistics Capabilities in Achieving Supply Chain Agility: A Systematic Literature Review, **Supply Chain Management**, v. 17, 2012.

GROBNER, M. Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Just-in-time-, Just-in-sequence-und One-piece-flow-Fertigungskonzepten. *Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen*, p. 14-17, 2007.

GRONAU, N. Determinants of an appropriate degree of autonomy in a cyber-physical production system. **Proceedings of 52<sup>th</sup> Changeable, Agile, Reconfigurable & Virtual Production**, v. 52, p. 1-5, 2016.

HERLYN, W. J. **PPS in der Automobilindustrie: Produktionsprogrammplanung von Fahrzeugen und Aggregaten**. München, Carl Hanser, 2011.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review. **Conference Proceedings of 49<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences**, p. 3928-3937, 2016.

HERRON, C.; BRAIDEN, P. A methodology for developing sustainable quantifiable productivity improvement in manufacturing companies. **International Journal of Production Economy**, v. 104, p. 143–153, 2006.

HIROTA, E. H.; FORMOSO, C. T. O processo de aprendizagem na transferência dos conceitos e princípios da produção enxuta para a construção. **Encontro Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído**, 2000.

HITT, J. Problem-based learning in engineering. **Center for Teaching Excellence, United States Military Academy, West Point, NY**, 2010.

HOLM, M.; AHLSTROM, P. Lean Service – a literature review. **Center for Innovation and Operations Management**, p. 1-10, 2010.

HO, S. K. 5-S practice: the first step towards total quality management. **Total Quality Management**, v. 10, n. 3, p. 345-356, 1999.

HUHNS, M. N.; MENDOZA, B.; RUVINSKY, A.; MCCANTS, D. The jidoka system for multiple-sensor terrain classification. **Technical report, University of South Carolina**, v. 1, 2006.

ILLÉS, B.; TAMÁS, P.; DOBOS, P.; SKAPINYECZ, R. New challenges for quality assurance of manufacturing processes in Industry 4.0. **Solid State Phenomena**, v. 261, p. 481-486, 2017.

I-SCOOP. **Industry 4.0: the fourth industrial revolution guide to Industrie 4.0**. Disponível em: <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/>. Acesso em: 20 jun. 2017.

ISLAM, S. R.; KWAK, D.; KABIR, M. H.; HOSSAIN, M.; KWAK, K. S. The internet of things for health care: a comprehensive survey. **IEEE Access**, v. 3, p. 678-708, 2015.

JASTI, N.; KODALI, R. Lean production: Literature review and trends. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 3, p. 867-885, 2015.

JIMÉNEZ, M.; ROMERO, L.; DOMÍNGUEZ, M.; DEL MAR ESPINOSA, M. 5S methodology implementation in the laboratories of an industrial engineering university school. **Safety science**, v. 78, p. 163-172, 2015.

KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; HELLINGER, A.; WAHLSTER, W. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; Final report of the Industrie 4.0. Working Group. **Forschungsunion**, 2013.

KANIGOLLA, D.; CUDNEY, E.; CORNS, S. Enhancing engineering education using project-based learning for lean and six sigma. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 5, n. 1, p. 45-61, 2014.

KARAKOSE, M.; YETIS, H. A Cyberphysical System Based Mass-Customization Approach with Integration of Industry 4.0 and Smart City. **Wireless Communications and Mobile Computing**, 2017.

KERN, W.; RUSITSCHKA, F.; KOPYTYNSKI, W.; KECKL, S.; BAUERNHANSL, T. Alternatives to assembly line production **In the Automotive Industry**. In: **The 23<sup>rd</sup> International Conference on Production Research**, p. 1-9, 2015.

KETOKIVI M.; SCHROEDER R Manufacturing practices, strategic fit and performance: a routine-based view. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 24, n. 2, p. 171-191, 2004.

KIBIRA, D.; MORRIS, K.; KUMARAGURU, S. Methods and tools for performance assurance of smart manufacturing systems. **National Institute of Standards and Technology**, v. 121, p. 281-313, 2015.

KIEL, D.; MULLER, J. M.; ARNOLD, C.; VOIGT, K. I. Sustainable industrial value creation: benefits and challenges of industry 4.0. **International Journal of Innovation Management**, v. 21, n. 8, p. 1740015 2017.

KIRAZLI, A.; HORMANN, R. A conceptual approach for identifying Industrie 4.0 application scenarios. In: **IIE Annual Conference. Proceedings**, p. 862, 2015.

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

KOLBERG, D.; BERGER, C.; PIRVU, B. C.; FRANKE, M.; MICHNIEWICZ, J. Insights from a framework for designing cyber-physical systems in production environments. **Proceedings of the 49<sup>th</sup> Conference on Manufacturing Systems**, v. 57, p. 32-37, 2016.

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

KOURI, I. A.; SALMIMAA, T. J.; VILPOLA, I. H. The principles and planning process of an electronic kanban system. **Novel algorithms and techniques in telecommunications, automation and industrial electronics**. p. 99-104, 2010.

KOZLENKOVA, I. V.; HULT, G. T. M.; LUND, D. J.; MENA, J. A.; KEKEC, P. The role of marketing channels in supply chain management. **Journal of Retailing**, v. 91, n. 4, p. 586-609, 2015.

KOTANI, S. Optimal method for changing the number of kanbans in the e-Kanban system and its applications. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 24, p. 5789-5809, 2007.

KUMAR, M.; ANTONY, J.; SINGH, R. K.; TIWARI, M. K.; PERRY, D. Implementing the Lean Sigma framework in an Indian SME: a case study. **Production Planning and Control**, v. 17, n. 4, p. 407-423, 2006.

KUMAR, C. S.; PANNEERSELVAM, R. Literature review of JIT-KANBAN system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 32, n. 3-4, p. 393-408, 2007.

KUSTERS, D., PRAB, N.; GLOY, Y. S. Textile learning factory 4.0—preparing Germany's textile industry for the digital future. **Procedia Manufacturing**, v. 9, p. 214-221, 2017.

LAGE, J. M.; GODINHO FILHO, M. Variations of the kanban system: Literature review and classification. **International Journal of Production Economics**, v. 125, n. 1, p. 13-21, 2010.

LANDSCHEIDT, S.; KANS, M. Automation practices in wood product industries: lessons learned, current practices and future perspectives. **Proceedings of the 7<sup>th</sup> Swedish Production Symposium SPS**, p. 25-27, 2016.

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

LEAL, Fabiano *et al.* Learning lean with lego: developing and evaluating the efficacy of a serious game. **Production**, v. 27, 2017.

LEE, C. K. M.; ZHANG, S. Z.; NG, K. K. H. Development of an industrial Internet of things suite for smart factory towards re-industrialization. **Advances in Manufacturing**, v. 5, n. 4, p. 335-343, 2017.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.

LEE, S. G.; MA, Y. S.; THIMM, G. L.; VERSTRAETEN, J. Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul. **Computers in industry**, v. 59, n. 2-3, p. 296-303, 2008.

LEONARD, K. M.; PAKDIL, F. **Performance Leadership TM**. Business Expert Press, 2016.

LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E. D. F. R.; RAMOS, L. F. P. Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v.55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.

LIKER, J. K.; FRANZ, J. K. **The Toyota way to continuous improvement: Linking strategy and operational excellence to achieve superior performance**, v. 1, New York: McGraw-Hill, 2011.

LIKER, J. K.; HOSEUS, M.; CENTER FOR QUALITY PEOPLE AND ORGANIZATIONS. **Toyota culture**. New York: McGraw-Hill, 2008.

LIKER, J. K. **The 14 principles of the Toyota way: an executive summary of the culture behind TPS**. The Toyota Way, v. 14, n. 1, p. 35-41, 2004.

LOBAUGH, M. Lean manufacturing: a unique approach to educating students. **Age**, v. 10, n. 1, 2005.

MACHOVA, M. Automation versus modeling and simulation. **The Textile Institute Book Series**, v. 2, p. 29-48, 2018.

MARJANI, M.; NASARUDDIN, F.; GANI, A.; KARIM, A.; HASHEM, I. A. T.; SIDDIQA, A.; YAQOOB, I. Big IoT data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges. **IEEE Access**, v. 5, p. 5247-5261, 2017.

MARODIN, G., SAURIN.T. Implementing lean production systems: research areas and opportunities for future studies. **International Journal Production Research** v. 51, n. 22, p. 6663-6680, 2013.

MARTINEZ, F.; JIRSAK, P.; LORENC, M. Industry 4.0. The end lean management? **The 10<sup>th</sup> international Days of Statistics and Economics**, p. 8-10, 2016.

- MELTON, T. The benefits of lean manufacturing what lean thinking has to offer the process industries. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 83, n. 6, p. 662-673, 2005.
- MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C. P.; GALVÃO, C.M. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto Contexto Enfermagem**, Florianópolis, v. 17, n. 4, p. 758-764, 2008.
- MICIETA, B.; HERCKO, J.; BOTKA, M.; ZRNIC, N. Concept of intelligent logistic for automotive industry. **Journal of Applied Engineering Science**, v. 14, n. 2, p. 233-238, 2016.
- MIT TECHNOLOGY REVIEW. **Additive manufacturing GE, the world's largest manufacturer, is on the verge of using 3-D printing to make jet parts**. Disponível em: <https://www.technologyreview.com/s/513716/additive-manufacturing/>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- MOISES, D.; ALBERTO, C. Evaluation of Students' General Perceptions of Problem- Based Learning in a Computer Engineering Program in Brazil. v. 68, 2015.
- MORAES, L. P. *et al.* Melhoria na qualidade de ensino dos cursos de graduação e pós-graduação de engenharia de produção utilizando o **Lean Board Game**, 2013.
- MOURTZIS, D.; VLACHOU, A.; ZOGOPOULOS, V. Cloud-based augmented reality remote maintenance through shop-floor monitoring: a product-service system approach. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 139, n. 6, p. 061011, 2017.
- MOURTZIS, D.; ZOGOPOULOS, V.; VLACHOU, E. Augmented reality application to support remote maintenance as a service in the Robotics industry. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 46-51, 2017.
- MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. Towards lean production in industry 4.0. **Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Engineering, Project, and Production Management**, v. 182, p. 466-473, 2017.
- NASCIMENTO, D.; ALENCASTRO, V.; QUELHAS, O.; CAIADO, R.; GARZA-REYES, J.A.; LONA, L.R.; TORTORELLA, G. Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal, **Journal of Manufacturing Technology Management**, v.30, n.3, p. 607-627, 2019.
- NOONEN, M.; JONES, S. Can lean innovation bring growth and profits back to semiconductors?. **Solid State Technology**, v. 57, n. 5, p. 19-24, 2014.
- NUNES, M. L.; PEREIRA, A. C.; ALVES, A. C. Smart products development approaches for industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1215-1222, 2017.
- OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção**. Porto Alegre: Bookman, 1997.
- OHNO, T. **Toyota Production System**, Productivity Press, Portland, OR, 1988.
- PASLAUSKI, Carolina Amaral. **A contribuição do setor de suporte ao produto para o processo de servitização: uma perspectiva da transferência de conhecimento interfuncional no**

PDP. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PEREIRA, Lais do Nascimento. **Proposição de um método de avaliação da implementação enxuta em pequenas empresas.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

PEREIRA, M. A.; BARRETO, M. A.; PAZETI, M. Application of Project-Based Learning in the first year of an Industrial Engineering Program: lessons learned and challenges. **Production**, v. 27, 2017.

PETER, G. “Hands-on graduate courses in lean manufacturing (LM) emphasizing green and total productive maintenance (TPM)”, **Proceedings of American Society of Mechanical Engineers, 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, pp. 357-365, 2010.

PFEIFFER, S. Robots, Industry 4.0 and humans, or why assembly work is more than routine work. **Societies**, v. 6, n. 2, p. 16, 2016.

POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; OYARZUN, D.; STRICKER, D.; AMICIS, R.D. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. **Computer Graphics and Applications**, v. 35, 2015.

PRINZ, C.; MORLOCK, F.; FREITH, S.; KREGGENFELD, N.; KREIMEIER, D.; KUHLENKÖTTER, B. Learning Factory modules for smart factories in Industrie 4.0. **Procedia CIRP**, v. 54, p. 113-118, 2016.

QU, T.; BIN, S.; HUANG, G. Q.; YANG, H. D. Two-stage product platform development for mass customisation. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 8, p. 2197-2219, 2011.

RAD, C. R.; HANCU, O.; TAKACS, I. A.; OLTEANU, G. Smart monitoring of potato crop: A cyber-physical system architecture model in the field of precision agriculture. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 6, p. 73-79, 2015.

RADZIWON, A.; BILBERGA, A.; BOGERSA, M.; MADSEN, E.S. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. **International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation**, v. 69, p. 1184-1190, 2014.

RANKY, P. G. Eighteen “monozukuri-focused” assembly line design and visual factory management principles with DENSO industrial examples. **Assembly Automation**, v. 27, n. 1, p. 12-16, 2007.

RANZ, F.; SCHUHMACHER, J.; HUMMEL, V. Competence development for collaborative work systems in learning factories. In: **IIE Annual Conference. Proceedings Institute of Industrial and Systems Engineers**, 2015.

REN, L.; ZHANG, L.; TAO, F.; ZHAO, C.; CHAI, X.; ZHAO, X. CCloud manufacturing: from concept to practice. **Enterprise Information Systems**, v. 9, n. 2, p. 186-209, 2015.



REZENDE, H. A.; ANTUNES, JR. C., SENNA, P.; SOUZA, L. A., MONTEIRO, A. Determinação de métricas e mapeamento riscos para a análise de cadeias de suprimentos enxutas. **Journal of Lean System**, v. 1 n. 1, p. 31- 50, 2016.

RODSETH, H.; SCHJOLBERG, P.; MARHAUG, A. Deep digital maintenance. **Advances in Manufacturing**, v. 5, n. 4, p. 299-310, 2017.

RONG, W.; VANAN, G. T.; PHILLIPS, M. The internet of things (IoT) and transformation of the smart factory. In: **Electronics Symposium (IES) 2016 International**, p. 399-402, 2016.

ROSSINI, M.; COSTA, F.; TORTORELLA, G.L.; PORTIOLI-STAUDACHER, A. The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9-12, p. 3963-3976, 2019.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda**. Lean Enterprise Institute, 2003.

RUBMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston Consulting Group**, v. 9, 2015.

SACKEY, S. M.; BESTER, A.; ADAMS, D. Industry 4.0 learning factory didactic design parameters for industrial engineering education in South Africa. **South African Journal of Industrial Engineering**, v. 28, n. 1, p. 114-124, 2017.

SALMI, A.; DAVID, P.; BLANCO, E.; SUMMERS, J. Deciding the level of automation during the design of assembly systems: Literature review of decision methods and a new approach proposal. **International Conference on Computers & Industrial Engineering**, 2015.

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

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

SANIUK, S.; SANIUK, A. Decision support system for rapid production order planning in production network. In: **International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance**, p. 217-226, 2017.

SANTORELLA, G. **Lean culture for the construction industry: Building responsible and committed project teams**. Taylor & Francis, 2017.

SANTOS, B. P.; SILVA, L. A.; CELES, C. S.; BORGES, J. B.; NETO, B. S. P.; VIEIRA, M. A. M.; LOUREIRO, A. A. Internet das coisas: da teoria a prática. **Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, 2016.

SCHEIN, E. H. **Organizational Culture and Leadership (Jossey-Bass business & management series)**. Jossey Bass Incorporated, 2004.

SCHONBERGER, R. J. Japanese production management: An evolution with mixed success. **Journal of Operations Management**, v. 25, n. 2, p. 403-419, 2007.

SCHUH, G.; ANDERI, R.; GAUSEMEIER, J. Industrie 4.0 maturity index. Managing the digital transformation of companies. **Acatech Study**, 2017.

SCHUH, G.; POTENTE, T.; WESCH-POTENTE, C.; WEBER, A. R.; PROTE, J. P. Collaboration mechanisms to increase productivity in the context of industrie 4.0. **Procedia CIRP**, v. 19, p. 51-56, 2014.

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

SHAH, R.; WARD, P. T. Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. **Journal of operations management**, v. 21, n. 2, p. 129-149, 2003.

SHAH, R.; WARD, P.T. Defining and Developing Measures of Lean Production. **Journal of operations management**, v.25, p. 785-805, 2007.

SHARIATZADEH, N.; LUNDHOLM, T.; LINDBERG, L.; SIVARD, G. Integration of digital factory with smart factory based on internet of things. **Proceedings of 26<sup>th</sup> Design Conference**, v. 50, p. 512-517, 2016.

SHEPPARD, S. D.; MACATANGAY, K.; COLBY, A.; SULLIVAN, W.M. Educating engineers: Designing for the future of the field. Book Highlights, **Carnegie Foundation for the Advancement of Teaching**, 2008.

SHIH, L. H.; LEE, Y. T.; HUARNG, F. Creating customer value for product service systems by incorporating internet of things technology. **Sustainability**, v. 8, n. 12, p. 1217, 2016.

SHUKLA, A.; KARKI, H. Application of robotics in onshore oil and gas industry - A review Part I. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 75, p. 490-507, 2016.

SIBATROVA, S.; VISHNEVSKIY, K. Present and future of the production: integrating lean management into corporate foresight, **Higher School of Economics Research**, 2016.

SIMPSON, D.F.; POWER, D.J. Use the supply relationship to develop lean and green suppliers. **Supply Chain Management**, v. 10, n.1, p.60-68, 2005.

SPANN, M. S.; ADAMS, M.; RAHMAN, M.; CZARNECKI, H.; SCHROER, B. J. Transferring lean manufacturing to small manufacturers: **The role of NIST-MEP**. 1999.

SPATH, D.; GERLACH, S.; HAMMERLE, M.; SCHLUND, S.; STROLIN, T. Cyber-physical system for self-organised and flexible labour utilisation. **Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Production Research**, v. 50, n. 22, 2013.

- STAUFEN, A. G. China–Industry 4.0 Index 2015. **Industry 4.0 and Lean**, 2016.
- STRANDHAGEN, J. W.; ALFNES, E.; STRANDHAGEN, J. O.; VALLANDINGHAM, L. R. The fit of industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study. **Advances in Manufacturing**, v.5, n. 4, p. 344-358, 2017.
- STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. **Procedia Cirp**, v. 40, p. 536-541, 2016.
- STOJKIC, Z.; VEZA, I.; BOSNJAK, I. Concept of information system implementation (crm and erp) within industry 4.0. In: **26<sup>th</sup> DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation**, p. 912-919, 2016.
- STRANDHAGEN, J. W.; ALFNES, E.; STRANDHAGEN, J. O.; VALLANDINGHAM, L. R. The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study. **Advances in Manufacturing**, v. 5, n. 4, p. 344-358, 2017.
- STRUEKER, J.; WEPPNER, H. A Cloud-based Messaging Service for Cross-Enterprise Data Exchange with Smart Objects. **Proceedings in Association for Information Systems**, 2012.
- TAMÁS, P.; ILLÉS, B.; DOBOS, P. Waste reduction possibilities for manufacturing systems in the industry 4.0. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 161, n. 1, p. 012074, 2016.
- TAMÁS, P.; ILLÉS, B. Process improvement trends for manufacturing systems in industry 4.0. **Academic Journal of Manufacturing Engineering**, v. 14, n. 4, 2016.
- TAMÁS, P. Decision support simulation method for process improvement of intermittent production systems. **Applied Sciences**, v.7, n. 9, p. 950, 2017.
- TAO, F.; ZHANG, L.; VENKATESH, V. C.; LUO, Y.; CHENG, Y. Cloud manufacturing a computing and service-oriented manufacturing model. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 225, n. 10, p. 1969-1976, 2001.
- TAUFIK, M.; JAIN, P. K. Role of build orientation in layered manufacturing: a review. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, v. 27, n. 1-3, p. 47-73, 2013.
- TERENZINI, P. T., A. F. Cabrera, C. L. Colbeck, J. M. Parente, S. A. Bjorklund, Collaborative Learning vs. Lecture/Discussion: Students' Reported Learning Gains. **Journal of Engineering Education**, v. 90, n. 1, p. 143-150, 2001.
- TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p.2975-2987, 2017.
- TORTORELLA, G.; MIORANDO, R.; CAIADO, R.; NASCIMENTO, D.; PORTIOLI STAUDACHER, A. The mediating effect of employees' involvement on the relationship

between Industry 4.0 and operational performance improvement, **Total Quality Management & Business Excellence**, p. 1-15, 2018.

TRSTENJAK, M.; COSIC, P. Process planning in Industry 4.0 environment. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 1744-1750, 2017.

ULUTAS, B. An application of SMED Methodology. **World academy of science, engineering and technology**, v. 79, p. 101, 2011.

VALMOHAMMADI, C. Examining the perception of Iranian organizations on internet of things solutions and applications. **Industrial and Commercial Training**, v. 48, n. 2, p. 104-108, 2016.

VILLALBA, D. J.; ORDIERES, M. J. B.; NUBER, G. The HOSHIN KANRI TREE. Cross-plant lean shopfloor management. **Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Learning Factories**, v. 32, p. 150-155, 2015.

VINODH, S.; ARVIND, K.R.; SOMANAATHAN, M. Tools and techniques for enabling sustainability through lean initiatives **Clean. Tech. Environ. Policy** v. 13, n. 3, p. 469-479, 2011.

WAGNER, T.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. Industry 4.0 impacts on lean production systems. **Proceedings of the 50<sup>th</sup> Conference on Manufacturing Systems**, v. 63, p. 125-131, 2017.

WAN, H.; CHEN, F. A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 23, p. 6567-6584, 2008.

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. **Computer Networks**, v. 101, p. 158-168, 2016.

WEYER, S.; SCHMITT, M.; OHMER, M.; GORECKY, D. Towards industry 4.0-standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. **IFAC-Papers online**, v.48, n. 3, p. 579-584, 2015.

WHITE, H. Problem-based learning, *Speaking of Teaching*, v. 11, n. 1, p. 1-7, 2001.

WIECH, M.; BOLLHOFF, J.; METTERNICH, J. Development of an optical object detection solution for defect prevention in a Learning Factory. **Procedia Manufacturing**, v. 9, p. 190-197, 2017.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. Lean thinking - banish waste and create wealth in your corporation. **Journal of the Operational Research Society**, v. 48, n. 11, p. 1148-1148, 1997.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A mentalidade enxuta nas empresas: Elimine o desperdício e crie riqueza**, 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A máquina que mudou o mundo**. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

XU, Y.; CHEN, M. Improving just-in-time manufacturing operations by using internet of things based solutions. **Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprise Technology**, v. 56, p. 326-331, 2016.

XU, R.; YANG, L.; YANG, S. H. Architecture design of internet of things in logistics management for emergency response. In: **Green Computing and Communications (GreenCom), IEEE and Internet of Things (iThings/CPSCoM), IEEE International Conference on e IEEE Cyber, Physical and Social Computing**, p. 395-402, 2013.

YOON, J. S.; SHIN, S. J.; SUH, S. H. A conceptual framework for the ubiquitous factory. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 8, p. 2174-2189, 2012.

ZHANG, Z.; LIU, G.; JIANG, Z.; CHEN, Y. A cloud-based framework for lean maintenance, repair, and overhaul of complex equipment. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 137, n. 4, p. 040908, 2015.

ZHU, H.; GAO, J.; LI, D.; TANG, D. A Web-based Product Service System for aerospace maintenance, repair and overhaul services. **Computers in Industry**, v. 63, n. 4, p. 338-348, 2012.

ZÜEHLKE, D. Smart Factory - Towards a factory-of-things. **Annual Reviews in Control**, v. 34, n. 1, p. 129-138, 2010.

### 3 FASE 2 – AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE MATURIDADE PARA A INTEGRAÇÃO ENTRE INDÚSTRIA 4.0 E MANUFATURA ENXUTA

Marcos Malinverni Pagliosa

Guilherme Luz Tortorella

João Carlos Espíndola Ferreira

#### **Resumo:**

Com o advento da Indústria 4.0 (I4.0), um novo conjunto de tecnologias foi incorporado às abordagens existentes de gerenciamento de melhoria contínua, como a Manufatura Enxuta (ME). No entanto, essa integração pode nem sempre ser bem-sucedida devido a algumas características específicas de I4.0 e ME. Assim, esta Fase tem como objetivo propor um método de avaliação que permite priorizar a implementação da I4.0 e ME nas áreas produtivas de empresas manufatureiras, de acordo com seu grau de maturidade para auxiliar a integração da I4.0 e ME. Por meio da determinação do grau de maturidade em I4.0 e ME, torna-se possível identificar quais áreas são mais propensas a uma implementação em ambas as abordagens. Nesse sentido, foi elaborado um método que capaz de avaliar de maneira conjunta o grau de maturidade em I4.0 e ME, além de identificar quais áreas são mais propensas a uma implementação em ambas as abordagens. Tal método é ilustrado em diferentes áreas de manufatura de um fabricante brasileiro de autopeças, que vem passando por uma implementação enxuta há mais de 10 anos, e começou a adotar a I4.0. Os resultados indicam que nem todas as áreas de empresa apresentam a mesma propensão e algumas de suas características específicas podem facilitar ou prejudicar essa integração. De uma perspectiva prática, a avaliação da maturidade conjunta em I4.0 e ME permite que as organizações priorizem seus esforços e conduzam uma implementação de modo mais assertivo, reduzindo esforços e investimentos desnecessários e obtendo dessa forma, resultados de desempenho mais significativos por meio de uma implementação mais holística e que considere as características de ambas as abordagens.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0. Manufatura enxuta. Grau de maturidade. Integração

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O termo Indústria 4.0 (I4.0) foi cunhado no ano de 2011, durante a feira de Hannover na Alemanha e refere-se à nova revolução tecnológica pela qual a indústria está passando. A I4.0 representa uma nova fase na evolução industrial e oferece significativos avanços tecnológicos que capacitam as organizações a operarem em melhores níveis de qualidade, custo e desempenho (KAGERMANN *et al.*, 2013). As tecnologias inerentes à I4.0 promovem uma produção autônoma e dinâmica, adotando o conceito de manufatura inteligente (*smart manufacturing*) e permitindo aos integrantes da cadeia de valor uma intensa troca de dados em tempo real. Além disso, possibilitam que o sistema produtivo seja modular, variável e capaz de

produzir em massa produtos altamente customizados para atender mercados que exigem altos níveis de flexibilidade, agilidade e baixo custo de produção (RADZIWON *et al.*, 2014; KOLBERG *et al.*, 2017).

O surgimento de novos conceitos e tecnologias disruptivas fazem parte do ambiente dinâmico e altamente competitivo no qual as empresas manufatureiras estão inseridas (GLIGOR; HOLCOMB, 2012). Devido à série de benefícios que a I4.0 pode oferecer, muitas organizações pretendem investir na aquisição de suas tecnologias. Segundo pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2016), 48% das grandes empresas brasileiras planejam investir na I4.0, e o maior interesse está nas tecnologias voltadas para o aumento da eficiência e desempenho do processo produtivo.

Contudo, a existência de estratégias que promovem o aumento de competitividade das organizações antecede a I4.0. Dentre as abordagens mais comumente adotadas, cabe destacar a Manufatura Enxuta (ME) oriunda do Sistema Toyota de Produção. A ME caracteriza-se por ser uma abordagem sociotécnica que engloba práticas e princípios organizacionais que visam eliminar sistematicamente os desperdícios, melhorar a produtividade e a qualidade com forte foco nos requisitos do cliente (WOMACK *et al.*, 2007; LAGE JUNIOR; FILHO, 2010; JASTI; KODALI, 2015). A simplicidade de sua aplicação com os resultados alcançados são alguns dos motivos pelos quais a ME passou a ser amplamente adotada em um vasto número de organizações (SIMPSON; POWER, 2005; DENNIS, 2008; AHLSTROM; 2013; BURCH; SMITH, 2017).

No entanto, a ME, usualmente considerada como uma abordagem sistemática centrada no ser humano, destaca-se pela simplicidade e eficácia (DICKMANN, 2008), com princípios e práticas de gestão que não requerem necessariamente a aplicação de alta tecnologia (SEPPÄLÄ; SOILI, 2004), pode apresentar pontos conflitantes com as avançadas tecnologias compreendidas na I4.0. De acordo com Tortorella *et al.* (2018), a implementação simultânea de tecnologias da I4.0 e práticas enxutas (PEs) em empresas de manufatura pode levantar argumentos contraditórios, dadas as características convergentes e divergentes entre ambas. Além disso, o fato de várias empresas ainda terem dificuldades para entender a ideia geral da I4.0, seus conceitos e princípios específicos (EROL *et al.*, 2016; SANDERS *et al.*, 2016), pode comprometer a análise de possíveis impactos relacionados à sua adoção. Assim, apesar de a crescente notoriedade que este tema tem ganhado, ainda existem dúvidas relacionadas à viabilidade e eficácia da integração da I4.0 e suas tecnologias com a ME e suas PEs sobre aspectos importantes da manufatura.

Pautado na relevância dessa integração entre I4.0 e ME para o contexto industrial atual e na carência de trabalhos que examinam os efeitos dela (GJELDUM *et al.*, 2016; LANDSCHEIDT; KANS, 2016; KOLBERG *et al.*, 2017), pode-se levantar a seguinte questão de pesquisa: “*como identificar quais áreas produtivas são mais propensas à implementação concomitante da I4.0 e ME?*”. Para responder a esta pergunta, essa da pesquisa tem como objetivo propor um método de avaliação que permite priorizar a implementação da I4.0 e ME nas áreas produtivas de empresas manufatureiras de acordo com seu grau de maturidade. Para tanto, foi conduzido uma pesquisa exploratória em uma empresa brasileira de grande porte do setor automotivo, a qual vem implementando a ME há mais de 10 anos e que apresenta iniciativas de integração das tecnologias da I4.0. O método proposto é compreendido de procedimentos que envolvem tanto análise qualitativa quanto quantitativa do contexto em estudo. Além de a contribuição teórica já evidenciada, o presente trabalho apresenta implicações de caráter prático, à medida que oferece direcionamentos para auxiliar a implementação da I4.0 em empresas manufatureiras em implementação enxuta, e possibilitando um direcionamento prévio para uma implementação mais assertiva com o contexto da empresa.

A estrutura desta Fase está subdividida da maneira como segue. A seções 3.2 e 3.3 apresentam uma revisão da literatura a respeito da I4.0 e ME respectivamente. A seção 3.4 descreve o método proposto, cujos resultados estão descritos na seção 3.5. Por fim, a seção 3.6 finaliza o trabalho apresentando as conclusões e direcionamentos para futuras pesquisas.

### 3.2 INDÚSTRIA 4.0

Considerada como a quarta revolução industrial, a I4.0 representa um grupo de tecnologias e conceitos que pode ser aplicado na cadeia de valor das organizações por meio do uso de tecnologias de informação e comunicação tais como o *Cyber Physical Systems* (CPS) ou Sistemas Ciber-Físicos, *Internet of Things* (IoT) ou Internet das Coisas, e Big Data (I-SCOOP, 2017). A integração da I4.0 tem o potencial de alterar significativamente as cadeias produtivas, seus modelos de negócio e processos existentes (SCHMIDT *et al.*, 2015). Além disso, promove a integração digital que possibilita aos integrantes da cadeia de valor uma intensiva troca de dados e informações em tempo real e cria possibilidades para a melhoria dos processos (TAMÁS *et al.*, 2016; GUBÁN; KOVÁCS, 2017; SANDERS *et al.*, 2017). Segundo Kagermann *et al.* (2013), o emprego das tecnologias da I4.0 pode aumentar a qualidade do produto, ao mesmo tempo em que torna os processos de fabricação mais eficientes. Além disso, permite que o sistema de manufatura seja modular e flexível, viabilizando dessa forma, a



customização em massa (LASI *et al.*, 2014; POSADA *et al.*, 2015; CNI, 2016; TAMÁS *et al.*, 2016; XU; CHEN, 2016).

Apesar de o crescente destaque que o tema tem recebido, diversas organizações ainda apresentam dificuldade para entender a ideia geral, princípios e conceitos da I4.0 (SANDERS *et al.*, 2016). Para facilitar o entendimento acerca deste tema, minimizar erros e interpretações equivocadas, e orientar a implementação da I4.0, alguns roteiros e modelos de maturidade foram propostos na literatura (p.ex. ANDERL, 2014; LEE *et al.*, 2015; CHUKWUEKWE *et al.*, 2016; LEYH *et al.*, 2016; TONELLI *et al.*, 2016; LEYH *et al.*, 2017; SCHUH *et al.*, 2017; GHOBAKHLOO, 2018). Ganzarain e Errasti (2016) formularam um modelo de maturidade, formado por três estágios e cinco níveis que auxiliam as empresas a criarem um roteiro personalizado, orientado para a I4.0. Pokorni *et al.* (2017) elaboraram um modelo com 33 critérios principais e 130 indicadores, destinado a avaliar o grau de maturidade simultaneamente nas áreas da I4.0 e ME para ambientes fabris. A *Price Waterhouse Coopers* (PWC) estruturou um modelo de maturidade, contendo sete dimensões e quatro estágios, destinado a organizações que estão iniciando a caminhada rumo à adoção da I4.0 (PWC, 2016). O governo alemão propôs um modelo de maturidade para avaliar a Indústria 4.0 com 62 itens, agrupados em nove dimensões a saber: estratégia, liderança, clientes, produtos, operações, cultura, pessoas, governança e tecnologia (SCHUMACHER *et al.*, 2016).

Contudo, apesar de essas iniciativas, percebe-se que ainda existe muito para se entender e investigar no tocante aos impactos que a adoção da I4.0 pode representar para as organizações manufatureiras (GJELDUM *et al.*, 2016; KOLBERG *et al.*, 2016; LANDSCHEIDT; KANS, 2016; XU; CHEN, 2016; SANDERS *et al.*, 2017; SANTORELLA, 2017). No tocante às principais tecnologias da I4.0, diversas pesquisas têm despendido esforços visando relacioná-las, sendo possível dessa forma, encontrar na literatura diferentes classificações. O Quadro 9 consolida as nove principais tecnologias citadas na literatura.

Quadro 9 - Principais tecnologias da Indústria 4.0

<b>Código</b>	<b>Tecnologia I4.0</b>	<b>Autores</b>
$t_1$	<i>Internet of Things (IOT)</i> ou Internet das coisas	ZÜEHLKE (2010); TAO <i>et al.</i> (2011); SPATH <i>et al.</i> (2013); FLEISCH <i>et al.</i> (2015); ARNOLD (2016); ALIAS <i>et al.</i> (2017).
$t_2$	<i>Cyber physical system (CPS)</i> ou Sistemas cyber físicos	BROY <i>et al.</i> (2012); SPATH <i>et al.</i> (2013); BRETTEL <i>et al.</i> (2014); KERN <i>et al.</i> (2015); CHIANG; LEE (2017).

$t_3$	Cloud computing ou Computação em nuvem	SPATH <i>et al.</i> (2013); REN <i>et al.</i> (2014); RUBMANN <i>et al.</i> (2015); STOCK; SELIGER (2016); XU; SACKKEY <i>et al.</i> (2017).
$t_4$	Big Data	LEE <i>et al.</i> (2014); BAGHERI <i>et al.</i> (2015); SANDERS <i>et al.</i> (2016); TRSTENJAK; COSIC (2017); WAGNER <i>et al.</i> (2017).
$t_5$	Horizontal/vertical integration ou Integração horizontal e vertical	TAO <i>et al.</i> (2011); STRUKER; WEPPNER (2012); SPATH <i>et al.</i> (2013); IBIRA <i>et al.</i> (2015); CHEN <i>et al.</i> (2017).
$t_6$	Advanced robots ou Robotização avançada	LOBO (2015); RAMIREZ (2016); EROL <i>et al.</i> (2016); SACKKEY <i>et al.</i> (2017); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017).
$t_7$	Augmented reality ou Realidade aumentada	YONN <i>et al.</i> (2011); KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); RANZ <i>et al.</i> (2015); ARNOLD (2016); LIAO <i>et al.</i> (2017).
$t_8$	Simulation ou Simulação	SCHUH <i>et al.</i> (2014); KIBIRA <i>et al.</i> (2015); GRONAU (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); TAMÁS (2017).
$t_9$	Additive manufacturing ou Manufatura aditiva	DUGENSKE; LOUCHEZ (2014); SCHUMACHER <i>et al.</i> (2016); STOCK; SELIGER (2016); STRANDHAGEN; <i>et al.</i> (2017).

Em relação aos modelos de maturidade destinados à I4.0, conforme apresentado anteriormente, é possível se encontrar na literatura uma variedade de pesquisas e modelos destinados a esse propósito (ANDERL, 2014; LEE *et al.*, 2015; CHUKWUEKWE *et al.*, 2016; GANZARAIN; ERRASTI, 2016; LEYH *et al.*, 2016; PWC, 2016; SCHUMACHER *et al.*, 2016; TONELLI *et al.*, 2016; LEYH *et al.*, 2017; POKORNI *et al.*, 2017; SCHUH *et al.*, 2017; GHOBAKHLOO, 2018). Porém, somente uma parcela destes contempla os ambientes da manufatura. À vista disso, o Quadro 10 consolida as principais dimensões e critérios utilizados em alguns dos principais modelos destinados à análise de maturidade em I4.0 e que são voltados ao contexto da manufatura. Nesse sentido, 55 critérios foram analisados criticamente, eliminando-se redundâncias de forma a totalizarem 20 principais critérios para a avaliação do grau de maturidade em I4.0 (*i*). Em seguida, estes foram agrupados por similaridade em quatro dimensões principais; são elas: ( $di_1$ ) visão de futuro; ( $di_2$ ) cultura; ( $di_3$ ) operações; e ( $di_4$ ) tecnologia e análise de dados. A dimensão  $di_1$ , refere-se à capacidade da organização em entender o contexto da I4.0, construir um planejamento estratégico alinhado a esse contexto e disponibilizar recursos necessários. A dimensão  $di_2$ , representa as iniciativas voltadas à gestão e desenvolvimento de profissionais de cultura e perfil alinhados à I4.0. Já  $di_3$  visa representar as atividades voltadas a aspectos importantes da I4.0, tais como: descentralização, virtualização, operações em tempo real e análise. Por fim,  $di_4$  refere-se aos aspectos com forte cunho tecnológico capazes de permitir uma intensa e segura digitalização horizontal e vertical em toda a empresa.

Quadro 10 - Dimensões e critérios de maturidade da I4.0

Dimensões	Critérios para Avaliação da Maturidade da I4.0 por Autor					Consolidação dos critérios de maturidade	
	GANZARAIN; ERRASTI (2016)	LEYH <i>et al.</i> (2016)	PWC (2016)	SCHUMACHER <i>et al.</i> (2016)	SCHUH <i>et al.</i> (2017)		
$di_1$ Visão de futuro	Projetos I4.0		Modelos de negócios disruptivos e foco na competência principal	Adaptação a novos modelos de negócios		$i_1$ Plano para novos negócios	
	Entendimento da I4.0	I4.0 atua como um facilitador da estratégia da empresa				$i_2$ Entendimento do contexto I4.0	
	Recursos para análise			Recursos para novos modelos de negócios	Mudança e adaptação dinâmica ao contexto de negócio	$i_3$ Disponibilidade de recursos	
$di_2$ Cultura		Desempenho ativo na I4.0	Colaboração como um valor-chave	Inovação aberta e compartilhamento do conhecimento	Entendimento do contexto e produção de conhecimento	$i_4$ Compartilhamento do conhecimento	
		Colaboração entre as organizações		Colaboração interdepartamental	Colaboração por meio das empresas	$i_5$ Colaboração	
		Cultura flexível	Conceitos e tecnologias inovadoras	Abertura dos funcionários para novas tecnologias		$i_6$ Cultura flexível	
	Treinamento e capacitação			Cultura I4.0 e treinamento	Funcionários com competências em TIC	Programa para treinamento dos funcionários	$i_7$ Treinamento voltado à I4.0
				Treinamento	Disposição da liderança	Descentralização da autonomia para a tomada de decisão	$i_8$ Liderança I4.0
				Análise de impacto e suporte para decisão	Competências e métodos		$i_9$ Suporte para tomada de decisão
	Gestão de risco				Coordenação central para a I4.0	$i_{10}$ Coordenação I4.0	

<i>di</i> <sub>3</sub> Operações			Descentralização da autonomia	Descentralização dos processos	Tomada de decisões por sistemas de TIC	<i>i</i> <sub>11</sub>	Descentralização
			Virtualização dos processos	Modelação e simulação	Capacidade preditiva	<i>i</i> <sub>12</sub>	Virtualização
	Capacidade de análise		Análise preditiva			<i>i</i> <sub>13</sub>	Capacidade de análise
				Otimização em tempo real		Áreas monitoradas em tempo real	<i>i</i> <sub>14</sub>
<i>di</i> <sub>4</sub> Tecnologia e análise de dados	Identificação de novos requerimentos	Fluxos de informações automáticos	Segurança na troca de dados	TIC <sup>a</sup> modernas	Segurança da informação	<i>i</i> <sub>15</sub>	TIC e segurança de dados
		Otimização e integração da rede de negócios	Integração de dados externos		Troca de dados entre empresas da mesma cadeia de valor		
	Identificação das tecnologias I4.0		Base de dados inteligente	Utilização de dispositivos móveis	Mapeamento de processos via Big Data	<i>i</i> <sub>16</sub>	Tecnologias 4.0
		Máquinas avançadas		Comunicação ente máquinas ( <i>M2M</i> )		<i>i</i> <sub>17</sub>	Máquinas avançadas
			Organizações flexíveis		Capacidade de adaptação a novas mudanças e Simulação de diferentes cenários	<i>i</i> <sub>18</sub>	Flexibilidade
			Algoritmos com autoaprendizagem			<i>i</i> <sub>19</sub>	Inteligência artificial
		Digitalização horizontal e vertical em toda a empresa	Organizações totalmente digitalizadas	Digitalização dos processos	Digitalização intensa	<i>i</i> <sub>20</sub>	Digitalização

Nota: <sup>a</sup>TIC=tecnologia de informação e comunicação.

### 3.3 MANUFATURA ENXUTA

A ME pode ser definida como uma abordagem produtiva que visa reduzir os desperdícios existentes ao longo da cadeia de valor, melhorar a produtividade e a qualidade de acordo com a perspectiva dos clientes (OHNO, 1998; SHAH; WARD, 2003; WOMACK *et al.*, 2007; LAGE JUNIOR; FILHO, 2010; LIKER; FRANZ, 2011; JASTI; KODALI, 2015). A ME visa reduzir a variação existente nos processos produtivos, podendo oferecer dessa forma, melhorias em desempenho e redução de custos (OHNO, 1988; WOMACK *et al.*, 2004; DENNIS, 2008). Esta abordagem se destaca pela simplicidade e eficácia, carecendo de um alinhamento estratégico com as necessidades do negócio e suas pessoas (SIMPSON; POWER, 2005; DENNIS, 2008; AHLSTROM; 2013; GAO; LOW, 2014; BURCH; SMITH 2017).

Segundo Hines *et al.* (2004), o entendimento sobre a ME e suas práticas vêm evoluindo à medida que as empresas amadurecem sua implementação. Os modelos de maturidade se constituem em uma ferramenta útil que possibilita às empresas acessarem o nível de seus processos organizacionais (ALBLIWI *et al.*, 2014). A literatura contém um vasto número de trabalhos relacionando à ME com modelos de maturidade (HAMDI; LEITE, 2012; POWELL *et al.*, 2013; ALBLIWI *et al.*, 2014; VERRIER *et al.*, 2016). Contudo, segundo Tortorella e Fettermann (2017), não existe um consenso a respeito de uma única maneira para se medir o grau de maturidade das PEs. Shah e Ward (2007) propuseram uma estrutura composta por dez grupos e 41 PEs, validando empiricamente esse modelo de abordagem. Nesse sentido, tem-se utilizado uma abordagem baseada nos níveis de adoção de algumas PEs pré-definidas (NETLAND; KASRA, 2014; MARODIN *et al.*, 2015).

Adicionalmente, diversas pesquisas evidenciaram a associação positiva entre a implementação das PEs e a melhoria do desempenho operacional (CONGER; MILLER, 2013; KANIGOLLA *et al.*, 2014; REZENDE *et al.*, 2016). Mais especificamente, alguns estudos reportam a integração entre as tecnologias da I4.0 com algumas PEs, as quais estão mostradas no Quadro 11.

Quadro 11 - Principais práticas enxutas

<b>Código</b>	<b>Práticas Enxutas</b>	<b>Autores</b>
$p_1$	<i>Kanban</i>	KOURI <i>et al.</i> (2010); DAVE <i>et al.</i> (2016); KOLBERG <i>et al.</i> (2017); TORTORELLA; FETTERMANN (2017).
$p_2$	<i>Value-stream mapping (VSM)</i> ou Mapeamento do fluxo de valor	BHAMU; SINGHK (2014); VILLALBA <i>et al.</i> (2015); TAMÁS <i>et al.</i> (2016); FERRERA <i>et al.</i> (2017).
$p_3$	<i>Poka-yoke</i> ou Sistemas à prova de erros	KOLBERG; ZÜEHLKE (2015); KUSTERS <i>et al.</i> (2017); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017).
$p_4$	<i>Kaizen</i>	BHAMU; SINGHK (2014); MARTINEZ <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017).
$p_5$	<i>Pull production</i> ou Produção puxada	ESMAEILIAN <i>et al.</i> (2016); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); FERRERA <i>et al.</i> (2017); KOLBERG <i>et al.</i> (2017).
$p_6$	<i>Andon</i>	BHAMU; SINGHK (2014); DAVE <i>et al.</i> (2016); MRUGALSKA; WYRWICKA (2017).
$p_7$	<i>SMED</i> ou Troca rápida de ferramentas (TRF)	MARTINEZ <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2016); KUSTERS <i>et al.</i> (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017).
$p_8$	<i>Standardization</i> ou Padronização	KOURI <i>et al.</i> (2010); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); KOLBERG <i>et al.</i> (2017).
$p_9$	<i>Total quality management (TQM)</i> ou Gestão da qualidade total	IBIRA <i>et al.</i> (2015); ELEFThERIADIS; MYKLEBUST (2016); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); DOMBROWSKI <i>et al.</i> (2017).
$p_{10}$	<i>Takt time</i> ou Tempo <i>takt</i>	KOURI <i>et al.</i> (2010); BHAMU; SINGHK (2014); SALMI <i>et al.</i> (2015); AYDOS; FERREIRA (2016).
$p_{11}$	<i>Heijunka</i> ou Nivelamento da produção	KOURI <i>et al.</i> (2010); BHAMU; SINGHK (2014); TAMÁS <i>et al.</i> (2016); KOLBERG <i>et al.</i> (2017).
$p_{12}$	5S	BHAMU; SINGHK (2014); TAMÁS <i>et al.</i> (2016); ILLÉS <i>et al.</i> (2017); SANDERS <i>et al.</i> (2017).
$p_{13}$	<i>Jidoka</i> ou Autonomia	BHAMU; SINGHK (2014); SANDERS <i>et al.</i> (2016); TAMÁS <i>et al.</i> (2016).
$p_{14}$	<i>Total productive maintenance (TPM)</i> ou Manutenção produtiva total	BHAMU; SINGHK (2014); SANDERS <i>et al.</i> (2016); SANDERS <i>et al.</i> (2017).

No tocante aos modelos de maturidade destinados à ME, o Quadro 12 apresenta alguns dos principais modelos propostos na literatura, os quais totalizam 103 critérios. Estes foram analisados criticamente e tiveram suas redundâncias descartadas, restando 34 principais critérios para a avaliação do grau de maturidade da implementação enxuta (*me*). Em seguida, estes foram agrupados por similaridade em oito dimensões principais, a saber: (*dme*<sub>1</sub>) visão de futuro; (*dme*<sub>2</sub>) cultura; (*dme*<sub>3</sub>) operações; (*dme*<sub>4</sub>) qualidade; (*dme*<sub>5</sub>) foco no cliente; (*dme*<sub>6</sub>) custos; (*dme*<sub>7</sub>) fornecedores; e (*dme*<sub>8</sub>) inventário. A dimensão *dme*<sub>1</sub> representa a capacidade da organização em se antecipar a mudanças de curto, médio e longo prazo. A dimensão *dme*<sub>2</sub> visa representar iniciativas voltadas à avaliação de desempenho, reconhecimento e desenvolvimento

dos funcionários. Já *dme*<sub>3</sub> aborda o conjunto das principais práticas voltadas a uma melhor gestão operacional, tais como: TPM, TRF e *Just in time*. A dimensão *dme*<sub>4</sub> refere-se à capacidade da organização em gerir o desempenho da qualidade, mitigar seus custos e prevenir falhas. Por sua vez, *dme*<sub>5</sub> está voltada à agregação de valor aos olhos do cliente em aspectos como customização, entrega, gestão de relacionamento e grau de satisfação frente as expectativas. A dimensão *dme*<sub>6</sub> abrange a administração dos custos diretos e indiretos relativos às atividades da empresa. A dimensão *dme*<sub>7</sub> contempla as atividades relacionadas a parcerias, seleção, avaliação de desempenho e envolvimento dos fornecedores. Por fim, *dme*<sub>8</sub> representa as atividades referentes à administração dos diferentes tipos de estoque e do nivelamento da produção.

Quadro 12 - Dimensões e critérios de maturidade para manufatura enxuta

Dimensões	Critérios para Avaliação de Maturidade da Manufatura Enxuta por Autor					Consolidação dos critérios de maturidade
	DOOLEN; HACKER (2005)	BHASIN (2008)	PAKDIL; LEONARD (2014)	MAASOUMAN; DEMIRLI (2015)	SANTOS; TONTINI (2018)	
<i>dme</i> <sub>1</sub> Visão de futuro		Antecipar futuras mudanças Plano de curto, médio e longo prazo			Planejamento estratégico Planejamento de longo prazo	<i>me</i> <sub>1</sub> Planejamento estratégico
		Desenvolvimento de novos mercados e novas tecnologias			Plano de negócio	<i>me</i> <sub>2</sub> Plano de negócio
<i>dme</i> <sub>2</sub> Cultura	Sistema formal de reconhecimento de funcionários	Produtividade por funcionário		Capacitação e motivação	Programas de envolvimento e reconhecimento	<i>me</i> <sub>3</sub> Política de reconhecimento dos funcionários
	Times multifuncionais		Trabalho em equipe	Trabalho em equipe	Times multifuncionais	<i>me</i> <sub>4</sub> Trabalho em equipe
	Avaliação de desempenho	Desenvolvimento técnico e pessoal da liderança	% funcionários trabalhando em equipe	Avaliação da liderança e planos de ação	Desenvolvimento de líderes dentro da empresa	<i>me</i> <sub>5</sub> Desempenho da liderança
		Desenvolvimento técnico e pessoal dos funcionários			Treinamento	<i>me</i> <sub>6</sub> Programas de treinamento
		Absenteísmo	Taxa de absenteísmo	Taxa de absenteísmo		<i>me</i> <sub>7</sub> Absenteísmo
		Rotatividade e retenção de cargos de liderança	Taxa de rotatividade			<i>me</i> <sub>8</sub> Rotatividade



<i>dme<sub>3</sub></i> Operações	Reconhecimento baseado no desempenho			Atividades necessárias no nível operacional	Desempenho operacional	<i>me<sub>9</sub></i> Desempenho operacional
		Melhorias no processo		Padronização de processos	Processos e ferramentas	<i>me<sub>10</sub></i> Padronização de processos
	Padronização		Tempo takt	Padronização		
	Redução do tempo de <i>setups</i> (TRF)		Tempo médio de <i>setups</i>		<i>Setups</i>	<i>me<sub>11</sub></i> <i>Setups</i>
	Tempo de ciclo	Melhoria da eficiência dos equipamentos	OEE <sup>b</sup>	OEE		<i>me<sub>12</sub></i> OEE
	TPM		Manutenção sem planejamento ou de emergência	Manutenção autônoma, preventiva e preditiva	TPM	<i>me<sub>13</sub></i> TPM
			Tempo total de máquina parada			<i>me<sub>14</sub></i> Manutenção preventiva
		Acidentes de segurança e saúde		Segurança, ergonomia e meio ambiente		<i>me<sub>15</sub></i> Segurança
	Fluxo puxado				Sistemas puxados	<i>me<sub>16</sub></i> Sistemas puxados
			Times destinados para resolução de problemas	Análise da capacidade do processo e melhorias	Melhoria contínua	<i>me<sub>17</sub></i> Melhoria contínua
				Análise e solução de problemas	Resolução de problemas e identificar causa raiz	

<i>dme<sub>4</sub></i> Qualidade	Gestão da qualidade total (TQM)	Índices da qualidade	Desempenho da qualidade		Qualidade na fonte	<i>me<sub>18</sub></i> Desempenho da qualidade
		Defeitos em produtos ou componentes críticos	Problemas de qualidade no cliente		Qualidade orientada para o cliente	
			Taxa de sucata e retrabalho	Taxa de sucata e retrabalho	Zero defeito	<i>me<sub>19</sub></i> Sucata e retrabalho
		Custos da qualidade	Custos da qualidade			<i>me<sub>20</sub></i> Custos da qualidade
	Prevenção de falhas			Controles preventivos de qualidade (CEP <sup>a</sup> e <i>Poka-yoke</i> )		<i>me<sub>21</sub></i> Prevenção de falhas
<i>dme<sub>5</sub></i> Foco no cliente	Customização dos produtos	Tempo de desenvolvimento para novos produtos			Gestão de relacionamento com o cliente	<i>me<sub>22</sub></i> Gestão de relacionamento com o cliente
		Medir relacionamento entre organização e cliente				
	Agregar valor aos olhos do cliente	Taxa de satisfação e retenção dos clientes	Grau de satisfação dos clientes		Análise da satisfação do cliente	<i>me<sub>23</sub></i> Satisfação dos clientes
		Resposta rápida (prazo definido pelo cliente)	Nº de reclamação dos clientes			
	Atendimento às expectativas do cliente				Identificar requisitos e expectativas do cliente	<i>me<sub>24</sub></i> Atender requisito dos clientes
	Desempenho das entregas	Entregas no prazo (prazo definido pelo cliente)	% entregas atrasadas	Entregas no prazo		<i>me<sub>25</sub></i> Entregas no prazo
<i>dme<sub>6</sub></i> Custos	Custos gerais	Custos de fabricação	Custos gerais	Custos de material e com paradas de produção	Custo de produção abaixo dos concorrentes	<i>me<sub>26</sub></i> Custo de produção
		Custos de material	% custo sobre as vendas			<i>me<sub>27</sub></i> Custos gerais
			Custo por unidade		Redução dos custos produtivos	<i>me<sub>28</sub></i> Redução dos custos

<i>dme</i> <sub>7</sub> Fornecedores	Parcerias de longo prazo		Parceria com fornecedores		Parceria e integração de fornecedores	<i>me</i> <sub>29</sub>	Parceria com fornecedores
	Gerenciamento de fornecedores	Seleção e redução do número de fornecedores	Seleção e redução do número de fornecedores		Desenvolvimento de fornecedores	<i>me</i> <sub>30</sub>	Seleção de fornecedores
	Avaliação dos fornecedores		Envolver fornecedores na solução de problemas		Envolver fornecedores no desenvolvimento de produtos	<i>me</i> <sub>31</sub>	Envolvimento de fornecedores
<i>dme</i> <sub>8</sub> Inventário		Giro do inventário	Taxa de giro do inventário	Taxa de giro do inventário	Giro de inventário	<i>me</i> <sub>32</sub>	Giro do inventário
		Controle do estoque de matéria-prima, bens em processo e itens prontos	Controle do % estoque de matéria-prima e % estoque prod. prontos	Controle do inventário e nível de redução do inventário		<i>me</i> <sub>33</sub>	Controle do inventário
			Nivelamento da produção	Nivelamento da produção		<i>me</i> <sub>34</sub>	Nivelamento da produção

Nota: <sup>a</sup>CEP=controle estatístico de processo, <sup>b</sup>OEE=*overall equipment effectiveness* ou eficácia geral do equipamento

### 3.4 MÉTODO PROPOSTO

Para se alcançar o objetivo proposto pelo presente trabalho, o método utilizado é compreendido de procedimentos que envolvem tanto análise qualitativa quanto quantitativa do contexto em estudo. Dessa forma, o trabalho é composto por quatro etapas principais: (i) selecionar os critérios de avaliação e áreas produtivas da empresa a serem avaliadas; (ii) avaliar a importância das dimensões em I4.0 e ME; (iii) avaliar o nível de desenvolvimento dos critérios em I4.0 e ME nas áreas da empresa que selecionadas; e (iv) elaborar um ranqueamento e priorização das áreas para uma implementação concomitante da I4.0 e ME.

#### 3.4.1 Selecionar os critérios de avaliação e áreas produtivas a serem avaliadas

A avaliação do nível de adoção em I4.0 e ME nas empresas pode ser feito de diferentes maneiras. Porém, uma forma eficiente de promover esse tipo de avaliação é por meio do uso de modelos de maturidade desenvolvidos para esse contexto. Modelos de maturidade são comumente utilizados para se medir o grau de maturidade de uma organização ou de um processo em relação a algum estado desejado (SCHUMACHER *et al.*, 2016). O grau de maturidade auxilia a definir o estado de desenvolvimento por meio de diferentes níveis determinados por um ponto inicial (menor grau de desenvolvimento) e um ponto final (maior grau de desenvolvimento) (BECKER *et al.*, 2009). De acordo com Parkes e Davern (2011), os modelos de maturidade constituem-se em importantes indicadores do nível organizacional e podem auxiliar a criar um roteiro para melhorias. Nesse sentido, pode-se dizer que os modelos de maturidade podem ser utilizados para se identificar um ponto de partida que permite as organizações iniciar um processo de desenvolvimento.

Em relação à I4.0, os critérios consolidados no Quadro 10 são utilizados para mensurar a maturidade das áreas em estudo. De forma análoga, os critérios mostrados no Quadro 12 são propostos para a medição da maturidade em ME. Nesse sentido, é proposto a utilização de 20 critérios *i* agrupados em quatro dimensões *di* para a avaliação do grau de maturidade em I4.0 e 34 critérios *me* agrupados em oito dimensões *dme* para a avaliação do grau de maturidade em ME.

A determinação das áreas produtivas da empresa avaliadas está baseada em três requisitos: (i) experiência com PEs; (ii) controle de desempenho operacional; e (iii) capacidade e viabilidade para a troca de dados em rede. Para o critério (i), é proposto a utilização de áreas que já tenham ao menos evidência de uma PE implementada ao longo de no mínimo um ano.

Para o critério (ii), é proposto a seleção das áreas que tenham implementados indicadores destinados à avaliação de desempenho operacional, em produtividade, qualidade e entrega. Para o critério (iii), é proposto a inclusão de áreas produtivas capazes de trocar dados com uma rede interna ou que no mínimo apresentem viabilidade técnica para serem adequadas a essa condição.

### 3.4.2 Avaliação da importância das dimensões em I4.0 e ME

A importância das dimensões correspondentes à I4.0 (*di*) e ME (*dme*) é definida por meio de entrevistas individuais semiestruturadas, realizadas com profissionais que atuam na empresa. Segundo Martins (2012), entrevistas semiestruturadas se constituem em um método capaz de capturar diferentes pontos de vista dos indivíduos de uma mesma organização. Assim, a exemplo de outros trabalhos, tais como Tortorella e Fogliatto (2014) e Tortorella *et al.* (2017), alguns requisitos são utilizados para selecionar os entrevistados: (i) possuir um cargo de liderança o qual permita visualizar a organização sob vários aspectos e de uma forma holística; (ii) possuir experiência mínima de 10 anos em implementação da ME em grandes empresas; e (iii) possuir conhecimento aprofundado em I4.0.

Objetivando-se aprimorar a qualidade das respostas, antes do início de cada entrevista, os respondentes recebem uma breve explicação, contendo uma definição uniforme sobre cada uma das dimensões utilizadas para representar o grau de maturidade em I4.0 e ME. Segundo Kothari (2004), essa prática pode evitar interpretações errôneas, mitigando possíveis erros nas respostas. Os entrevistados, então, fornecem respostas para a seguinte questão: “*qual a importância das quatro principais dimensões di e das oito principais dimensões dme para melhoria dos índices de desempenho operacional nas áreas produtivas?*”. Para cada dimensão de I4.0 e ME o nível de importância é atribuído seguindo uma escala Likert de 5 pontos, onde 1 representa ‘nenhuma importância’ e 5 refere-se à ‘máxima importância’, para a organização em estudo (ver Apêndice B). As diferentes pontuações obtidas com o nível de importância de cada uma das dimensões *di* e *dme* são usadas para se calcular a mediana. Optou-se por utilizar-se o valor da mediana dos entrevistados em vez de seu valor médio, visto que ao contrário da média, a mediana não é afetada por valores espúrios ou em desacordo com a tendência dos outros valores (TORTORELLA; FOGLIATTO, 2014). Por fim, de modo a consolidar os valores de importância, os valores atribuídos pelos entrevistados são reescalados em uma escala contínua de [0, 1] sendo que um alto valor reforça uma maior importância.

### 3.4.3 Avaliação do desenvolvimento dos critérios em I4.0 e ME

Para se definir o desenvolvimento dos principais critérios em I4.0 e ME, alguns funcionários da empresa em estudo são questionados. Contudo, para participação nesta pesquisa, exigiu-se que cada respondente estivesse de acordo com os seguintes requisitos (i) possuir um cargo de liderança em uma das áreas selecionadas, o que permite visualizá-la sob vários aspectos; (ii) possuir experiência mínima de 5 anos dentro da área selecionada; (iii) possuir experiência mínima de 5 anos em implementação da ME; e (iv) estar familiarizado com as tecnologias da I4.0. Visando obter respondentes com diferentes pontos de vista e experiências, também são convidados a responder os questionários um engenheiro especialista de cada uma das áreas selecionadas. O engenheiro especialista é um profissional responsável pelo suporte técnico e desenvolvimento de novos produtos nas áreas produtivas.

Os respondentes então fornecem respostas e evidências para questões relacionadas ao nível de atendimento dos indicadores destinados à avaliação de desempenho operacional em produtividade, qualidade e entrega da área em que atuam. Além disso, elaborou-se um questionário (ver Apêndice C) composto por três partes. A primeira parte consiste em questões com o objetivo de avaliar o perfil demográfico dos respondentes (p.ex. idade, formação acadêmica, tempo de empresa, entre outros). A segunda parte do questionário visa avaliar o nível de desenvolvimento de cada um dos 20 critérios em I4.0  $i_j$  ( $j = 1, \dots, 20$ ) listados no Quadro 10. O nível de desenvolvimento de cada critério é avaliado de acordo com uma escala de Likert que varia de 1 (nada desenvolvido) a 5 (plenamente desenvolvido). A terceira e última parte do questionário procura medir o nível de desenvolvimento dos 34 principais critérios em ME  $me_k$  ( $k = 1, \dots, 34$ ) (ver Quadro 12). Analogamente, utiliza-se uma escala Likert de 5 pontos, onde 1 denotava um critério ‘nada desenvolvido’ e 5 ‘plenamente desenvolvido’. Por fim, utiliza-se o valor da mediana dos respondentes para se reescalonar os valores em uma escala contínua de  $[0, 1]$ , sendo que um alto valor do critério evidencia um maior desenvolvimento.

Visando-se aprimorar a qualidade do instrumento de pesquisa, conforme sugere Babbie (1999), foi realizado um pré-teste com o questionário antes de sua aplicação definitiva. O pré-teste foi realizado com dois supervisores de área e um engenheiro especialista. Ao final do pré-teste o questionário foi considerado adequado pelos pesquisadores e pode ser aplicado aos demais respondentes. Por fim, para garantir que todos os respondentes selecionados estejam aptos a responder às questões relacionadas à I4.0, dado que esta é uma abordagem mais recentemente reconhecida, são tomadas algumas precauções. Todos os respondentes recebem

uma explicação prévia sobre cada uma das quatro dimensões  $di$  e 20 critérios  $ij$ , garantindo um entendimento único e evitando ambiguidades nas respostas oriundas de uma possível falha de entendimento. Além disso, os respondentes são informados que não existe resposta certa ou errada e que a pesquisa será feita em caráter anônimo.

### 3.4.4 Ranqueamento e priorização das áreas

O ranqueamento das áreas selecionadas é baseado no grau de importância das principais dimensões em I4.0 e ME e no nível de desenvolvimento dos seus principais critérios. Dessa forma, torna-se possível obter um valor de maturidade para a I4.0 ( $mi_n$ ) e ME ( $mme_n$ ) para cada uma das áreas  $n$  selecionadas onde ( $n = 1, \dots, h$ ) conforme é apresentado pelas as expressões (1) e (2), respectivamente:

$$mi_n = di_1 \sum_{j=1}^3 i_j + di_2 \sum_{j=4}^{10} i_j + di_3 \sum_{j=11}^{14} i_j + di_4 \sum_{j=15}^{20} i_j \quad (1)$$

$$\begin{aligned} mme_n = & dme_1 \sum_{k=1}^2 me_k + dme_2 \sum_{k=3}^8 me_k + dme_3 \sum_{k=9}^{17} me_k + dme_4 \sum_{k=18}^{21} me_k \\ & + dme_5 \sum_{k=22}^{25} me_k + dme_6 \sum_{k=26}^{28} me_k + dme_7 \sum_{k=29}^{31} me_k + dme_8 \sum_{k=32}^{34} me_k \quad (2) \end{aligned}$$

Posteriormente, é realizada a multiplicação dos valores do grau de maturidade de  $mi$  e  $mme$  pertencentes à mesma área  $n$ , definindo-se, assim, um grau de maturidade final ( $mf_n$ ) para cada uma das áreas  $n$  ( $n = 1, \dots, h$ ) conforme mostra a expressão (3). Desse modo, o grau de maturidade  $mf_n$  consegue contemplar os aspectos de maturidade relacionados à I4.0 e a ME de modo concomitante nas diferentes áreas.

$$mf_n = mi_n \times mme_n \quad (3)$$

Por fim, para melhor comparar os valores de ( $mf_n$ ) é criado um índice de normalização ( $pmf_n$ ) dado pelo número de desvios padrão ( $Smf_n$ ) de cada valor individual de  $mf_n$  em relação à média do grau de maturidade final ( $\overline{mf_n}$ ) conforme mostra a expressão (4) e os valores maiores

que  $\pm 1,0$  são destacados no Quadro 16. Segundo Hägg (2003), a pontuação normalizada é geralmente aplicada na análise do grau e maturidade.

$$pmf_n = \frac{mf_n - m_{fn}}{Smf_n} \quad (4)$$

Um alto valor de  $pmf_n$  denota um maior nível de maturidade o que significa uma maior propensão da referida área  $n$  em estar recebendo iniciativas que busquem uma adoção concomitante e bem-sucedida em I4.0 e ME. Com o intuito de auxiliar a gestão da empresa a direcionar os esforços de uma maneira mais assertiva, é realizado um ranqueamento das áreas produtivas com base no valor de  $pmf_n$  delas. Nesse sentido, o grau  $pmf_n$  deve ser analisado com atenção, pois pode assessorar a organização na elaboração de planos, definição de prioridades e ações que visem uma implementação concomitante em I4.0 e ME.

### 3.5 RESULTADOS

#### 3.5.1 Descrição da empresa

A metodologia proposta foi aplicada em uma empresa multinacional de grande porte, fabricante de autopeças, localizada na região sul do Brasil, com 59 anos de existência e aproximadamente 1.000 funcionários. O setor produtivo da empresa é estruturado em seis grandes áreas, organizadas em células e linhas de montagem. Já com relação ao mercado, a empresa atua como fornecedora de grandes montadoras do setor automotivo nos segmentos OEM (*Original Equipment Manufacturer* ou fabricante de equipamento original) e IAM (*Independent Aftermarket* ou mercado de reposição independente), comercializando seus produtos com mais de 60 países.

Buscando reduzir os desperdícios e elevar os índices de qualidade e competitividade, a organização iniciou um processo de implementação da ME no ano de 2006. Ao longo desse período ofereceu a seus colaboradores uma grande quantidade de ações voltadas à implementação da ME, tais como: *workshops*, treinamentos, *kaizens*, criação de uma semana *lean*, além de estruturar internamente um programa formal de capacitação em ME com uma carga horária de 50 horas. Devido aos bons resultados frente a seus clientes e premiações conquistadas na área da ME, a empresa passou a ser reconhecida por outras organizações e entidades especializadas em ME, como uma referência no processo de implementação de algumas PEs.



Em relação à I4.0, a organização iniciou estudos relacionados a este assunto no ano de 2017, ao longo desse período, ela buscou adquirir mais conhecimento sobre o tema, realizou treinamentos, *workshops* e firmou parceria com uma consultoria especializada em I4.0. Além disso, foi constituída uma comissão interna para discutir questões e elaborar estudos relacionados à adoção da I4.0. Por fim, a empresa definiu como um de seus objetivos a implementação da I4.0 de forma sinérgica com os princípios e PEs já consolidadas, objetivando dessa forma, potencializar os benefícios de ambas as abordagens (I4.0 e ME).

### 3.5.2 Seleção das áreas produtivas

O setor produtivo da organização está estruturado em seis diferentes áreas que participaram do processo de seleção, a saber: (i) Conformação; (ii) Ferramentaria; (iii) Usinagem; (iv) Tratamento Térmico; (v) Montagem; e (vi) Expedição. As áreas são organizadas em células de produção e linhas de montagem, possuem um total de 657 funcionários e apresentam uma experiência média de 9,5 anos com a implementação em ME, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Característica das áreas produtivas

Áreas produtivas	Nº de funcionários	Tempo de implementação em ME
Conformação	111	9 anos
Ferramentaria	39	9 anos
Usinagem	262	10 anos
Tratamento Térmico	42	9 anos
Montagem	168	10 anos
Expedição	35	10 anos

Em relação à seleção das áreas produtivas, conforme mencionado anteriormente, essa seleção foi baseada em três requisitos. O primeiro requisito se propôs a selecionar as áreas com PEs, implementada pelo período mínimo de um ano. Nesse sentido, algumas evidências foram observadas para justificar que as áreas estavam de acordo com o requisito proposto, tais como: registros de treinamentos referente ao uso de PEs nas áreas mencionadas, relatórios de auditorias e indicadores gerenciais, enfatizando o uso de PEs e a constatação em loco de algumas PEs. Além disso, cabe destacar que a avaliação das PEs foi realizada com o coordenador de melhoria contínua da empresa, o qual é o responsável pela implementação das PEs na empresa em estudo.

Todas as seis áreas apresentaram evidências de implementação de diversas PEs. As áreas com maior número de PEs, implementadas foram Usinagem e Montagem com o total de 10 e 8 PEs respectivamente. A área com menor número de PEs implementadas foi a Ferramentaria com 5 PEs. Ao todo as seis áreas juntas apresentaram um total de 43 PEs implementadas. O alto número de PEs implementadas pode ser justificado devido ao fato de a organização estar em processo de implementação em ME por mais de 10 anos. No tocante à implementação das PEs nas diferentes áreas, as PEs ‘5S’, ‘*kaizen*’ e ‘sistema a prova de erros’ estão presentes em todas as áreas. Já ‘VSM’ e ‘produção puxada’ foram encontradas em apenas duas áreas.

O segundo requisito se propôs a selecionar as áreas que possuem indicadores de desempenho operacional ligados à produtividade, qualidade e entrega. As evidências analisadas para justificar o atendimento dos requisitos foram obtidas por meio de relatórios gerenciais, indicadores disponíveis no quadro de gestão à vista e visitas *in loco* nas áreas. Todas as seis áreas apresentaram indicadores ligados a produtividade, a saber: OEE e tempo de *setup*. Já referente aos indicadores relacionados à qualidade e entrega, somente cinco áreas foram capazes de apresentar evidências desses indicadores. Particularmente, a área de Ferramentaria não apresentou indicadores relacionados a esses dois aspectos. Devido a esse fato, essa área foi então, suprimida do processo de seleção que prosseguiu com as cinco áreas restantes.

Por fim, o terceiro requisito se propôs a avaliar a capacidade e viabilidade para a troca de dados em rede das cinco áreas restantes. Para tanto, os setores de manutenção e TIC da empresa classificaram as áreas em duas categorias: (i) área capaz de trocar dados ou com alta viabilidade de adequação; e (ii) área não capaz de trocar dados e de baixa viabilidade de adequação. Quatro evidências foram observadas para justificar o atendimento desse requisito: (a) existência de uma rede de Internet disponível na área; (b) equipamentos com supervisórios capazes de trocar dados em rede; (c) equipamentos com atuadores controlados via sistema; e (d) existência de projeto que promova a troca de dados da área com alguma tecnologia da I4.0. As evidências (a), (b) e (c) foram observadas em todas as cinco áreas. Já a evidência (d) foi encontrada somente nas áreas de Usinagem e Expedição. No entanto, apesar de a evidência (d) ter sido encontrada apenas em duas das cinco áreas, o atendimento às evidências (a), (b) e (c) foi considerado suficiente para o atendimento desse requisito. Assim, todas as cinco áreas foram classificadas capazes de trocar dados ou com alta viabilidade de adequação.

Ao final do processo de seleção das áreas baseado nos três critérios propostos, cinco áreas produtivas foram selecionadas, a saber: (i) Conformação; (ii) Usinagem; (iii) Tratamento

Térmico; (iv) Montagem; e (v) Expedição. As áreas seleccionadas, assim como as evidências para os requisitos são apresentadas no Quadro 13.

Quadro 13 - Requisitos para seleção das áreas

Requisitos	Evidências das áreas produtivas				
	Conformação	Usinagem	Tratamento Térmico	Montagem	Expedição
PEs implementadas na área por um período mínimo de um ano	<i>Kanban</i> , sistemas à prova de erros, <i>kaizen</i> , <i>andon</i> , nivelamento da produção, 5S e TPM	<i>Kanban</i> , VSM, sistemas à prova de erros, <i>kaizen</i> , produção puxada, <i>andon</i> , TRF, nivelamento da produção, 5S e TPM	Sistemas à prova de erros, <i>kaizen</i> , <i>andon</i> , nivelamento da produção, 5S e TPM	<i>Kanban</i> , sistemas à prova de erros, <i>kaizen</i> , produção puxada, <i>andon</i> , TRF, nivelamento da produção e 5S	<i>Kanban</i> , VSM, sistemas à prova de erros, <i>kaizen</i> , produção puxada, 5S e TPM
Indicadores destinados à avaliação de desempenho em produtividade, qualidade e entrega	OEE das prensas, tempo de <i>setup</i> , nível de sucata e retrabalho, % de entregas no prazo	OEE das células de usinagem, tempo de <i>setup</i> , nível de sucata e retrabalho, % de entregas no prazo	OEE dos fornos, tempo de <i>setup</i> , nível de sucata e retrabalho, % de entregas no prazo	OEE das linhas de montagem, tempo de <i>setup</i> , nível de sucata e retrabalho, % de entregas no prazo	Produtividade individual por colaborador, nível de sucata e retrabalho, % de entregas no prazo
Capacidade de trocar dados com uma rede interna ou viabilidade técnica para serem adequadas a esta condição	(a) Rede de internet disponível; (b) Equipamentos com supervisórios capazes de trocar dados em rede; (c) Equipamentos com atuadores controlados via sistema	(a) Rede de internet disponível; (b) Equipamentos com supervisórios capazes de trocar dados em rede; (c) Equipamentos com atuadores controlados via sistema; (d) Existência de projeto que promova a troca de dados com alguma tecnologia da I4.0	(a) Rede de internet disponível; (b) Equipamentos com supervisórios capazes de trocar dados em rede; (c) Equipamentos com atuadores controlados via sistema	(a) Rede de internet disponível; (b) Equipamentos com supervisórios capazes de trocar dados em rede; (c) Equipamentos com atuadores controlados via sistema	(a) Rede de internet disponível; (b) Equipamentos com supervisórios capazes de trocar dados em rede; (c) Equipamentos com atuadores controlados via sistema; (d) Existência de projeto que promova a troca de dados com alguma tecnologia da I4.0

### 3.5.3 Perfil dos respondentes envolvidos

Para a definição da importância das dimensões  $dme$  e  $di$  cinco gerentes da empresa, responsáveis pela gestão de diversas áreas da organização, foram convidados para participar das entrevistas. Conforme mencionado anteriormente, as entrevistas iniciaram com uma explicação das principais dimensões em I4.0 e ME. Os entrevistados possuíam uma idade média de 43 anos, um tempo médio de 8 anos nessa função e uma experiência média de 14 anos com implementação em ME em grandes empresas. Além disso, três desses gerentes eram responsáveis pela gestão de todas as áreas produtivas da empresa. O perfil demográfico completo dos entrevistados é mostrado pela Tabela 3. As entrevistas tiveram a duração média de aproximadamente 35 minutos e foram realizadas no mês de abril de 2019. As observações e comentários dos entrevistados foram registrados de forma escrita.

Tabela 3 - Perfil demográfico dos gerentes

Perfil Demográfico	Gerente 1	Gerente 2	Gerente 3	Gerente 4	Gerente 5
Idade:	47	40	53	40	33
Formação acadêmica	Mestrado	Especialização	Especialização	Especialização	Especialização
Áreas	Conformação, Usinagem, Tratamento Térmico, Montagem e Manutenção	Compras e comércio exterior	Logística, PCP e Expedição	Engenharia de processos, Ferramentaria, Qualidade	Engenharia Produto, Pesquisa e desenvolvimento
Tempo na função atual	15 anos	11 anos	8 anos	4 anos	2 anos
Experiência com implementação em ME	11 anos	15 anos	21 anos	12 anos	10 anos

Em relação à avaliação da importância dos critérios  $i_{jn}$  e  $me_{kn}$  nas áreas produtivas, os questionários foram aplicados com um total de 40 respondentes. De maneira similar ao ocorrido nas entrevistas, inicialmente, os respondentes receberam uma explicação sobre os principais critérios em I4.0 e ME. A amostra foi constituída por 35 líderes (86%) e 5 engenheiros especialistas (14%). Os líderes possuíam em média 8 anos de experiência dentro de suas respectivas áreas, 9 anos de experiência com a implementação em ME e supervisionavam entre 28 e 45 funcionários. No tocante aos engenheiros especialistas, possuíam um tempo médio de 12 anos de experiência nas áreas selecionadas e 11 anos de experiência com a implementação

em ME. Devido ao fato de as áreas possuírem quantidades diferentes de funcionários e líderes, o número de respondentes entre as áreas também oscilou de acordo com o número de líderes existentes nelas. Os questionários foram aplicados no mês de abril de 2019, e o tempo médio de resposta foi de aproximadamente 30 minutos. O perfil e o número de respondentes das áreas são apresentados por meio da Tabela 4.

Tabela 4 - Número de respondentes por área e perfil demográfico dos líderes e especialistas

Área	Número de respondentes	%	Média das características dos respondentes
Conformação	8	20,0	Idade 38 anos
Usinagem	12	30,0	Tempo na empresa atual 16 anos
Tratamento Térmico	6	15,0	Tempo na função atual 9 anos
Montagem	8	20,0	Experiência com implementação em ME 9 anos
Expedição	6	15,0	

### 3.5.4 Avaliação do grau de maturidade e ranqueamento das áreas produtivas

#### 3.5.4.1 Avaliação das dimensões em I4.0

O grau de maturidade  $mi_n$  e  $mme_n$  das áreas produtivas selecionadas foi definido a partir das informações obtidas por meio das entrevistas realizadas com os gerentes e dos questionários respondidos pelos líderes e especialistas. O Quadro 14 apresenta o grau de maturidade  $mi_n$  das áreas produtivas. Além disso, tem-se a pontuação da mediana das dimensões (Med.  $di$ ) e critérios em I4.0 (Med.  $i_{jn}$ ), e seus respectivos valores reescalados ( $di$ ) e ( $i_{jn}$ ). De forma análoga, o Quadro 15 apresenta o grau de maturidade  $mme_n$ , a pontuação da mediana das dimensões (Med.  $dme$ ) e critérios em ME (Med.  $me_{kn}$ ), assim como seus respectivos valores reescalados ( $dme$ ) e ( $me_{kn}$ ).

Em relação à importância das quatro dimensões  $di$  avaliadas pelos gerentes, pôde-se observar que na visão destes, as dimensões que possuem uma maior importância para a melhoria dos índices de desempenho operacional foram  $di_1$  (visão de futuro) e  $di_3$  (operações), ambas obtendo um valor de mediana igual a 4,0. Segundo Ganzarain e Errasti (2016), a  $di_1$  se dedica em definir uma visão de I4.0 sob medida para a organização que, considerando seus pontos fortes e recursos existentes, passa a desenvolver o seu próprio entendimento sobre a I4.0. O entendimento do contexto atual, assim como a definição de uma visão de futuro adequada é fundamental para que a organização possa obter sucesso na implementação da I4.0 (PWC, 2016; SCHUH *et al.*, 2017). Em relação à dimensão  $di_3$ , ela engloba conceitos-chave da I4.0,

tais como: descentralização, virtualização, análise e operações em tempo real. Após a organização ter definido uma visão de futuro em I4.0, torna-se possível definir quais conceitos e tecnologias estão mais bem alinhados com o seu modelo de negócio. A aplicação adequada dos conceitos permite um alto nível de comunicação e interação entre os participantes do fluxo de valor (LASI *et al.*, 2014; POSADA *et al.*, 2015).

Referente às dimensões  $di_2$  (cultura) e  $di_4$  (tecnologia e análise de dados), ambas obtiveram uma pontuação de 3,0, sendo as dimensões de menor importância segundo a visão dos gerentes. A  $di_2$  engloba as iniciativas voltadas à gestão e desenvolvimento de profissionais alinhadas com a I4.0. O dinamismo da I4.0 e suas modernas tecnologias orientadas à digitalização e flexibilidade dos sistemas produtivos (RADZIWON *et al.*, 2014) requerem a criação de uma cultura organizacional que promova a colaboração, flexibilidade e o compartilhamento do conhecimento. Contudo, a escassez de profissionais qualificados são obstáculos que preocupam as empresas (PWC, 2016), podendo inclusive tornar-se em um fator impeditivo para a adoção da I4.0 (CNI, 2016). Nesse sentido, é importante que as organizações de manufatura se preparem para fazer investimentos e treinamentos para poderem ter acesso à I4.0.

Referente à  $di_4$ , essa dimensão aborda os aspectos de cunho tecnológico, que possibilitam uma digitalização horizontal e vertical em toda a empresa (PWC, 2016; SCHUMACHER *et al.*, 2016). Desse modo, torna-se possível integrar diferentes setores da empresa, por exemplo, engenharia, produção e qualidade. Essa integração possibilita melhorias em produtividade, custo e qualidade (CNI, 2016; TAMÁS *et al.*, 2016). O uso das tecnologias da I4.0 e da análise de dados irá conduzir as organizações a novos modelos de negócio e formas de se trabalhar (ALMADA-LOBO, 2016; SCHUH *et al.*, 2017).

Quadro 14 - Grau de maturidade  $mi$  por área

				Áreas produtivas									
				Conformação		Usinagem		Tratamento Térmico		Montagem		Expedição	
Dimensões I4.0 ( $di$ )	Med. $di$	$di$	Crítérios I4.0 ( $i_{jn}$ )	Med. $i_{j1}$	$i_{j1}$	Med. $i_{j2}$	$i_{j2}$	Med. $i_{j3}$	$i_{j3}$	Med. $i_{j4}$	$i_{j4}$	Med. $i_{j5}$	$i_{j5}$
$di_1$ Visão de Futuro	4,0	0,80	$i_{1n}$ Plano para novos negócios	1,0	0,010	1,5	0,015	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010
			$i_{2n}$ Entendimento do contexto da Indústria 4.0	1,5	0,015	2,5	0,025	2,0	0,020	2,0	0,020	2,0	0,020
			$i_{3n}$ Disponibilidade de recursos	1,0	0,010	2,0	0,020	2,0	0,020	2,0	0,020	1,5	0,015
$di_2$ Cultura	3,0	0,60	$i_{4n}$ Compartilhamento do conhecimento	2,0	0,020	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	2,0	0,020
			$i_{5n}$ Colaboração	1,0	0,010	1,5	0,015	2,0	0,020	1,0	0,010	2,5	0,025
			$i_{6n}$ Cultura flexível	1,5	0,015	2,0	0,020	2,0	0,020	2,0	0,020	2,5	0,025
			$i_{7n}$ Treinamento voltado à I4.0	2,0	0,020	2,0	0,020	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010
			$i_{8n}$ Liderança I4.0	2,0	0,020	2,0	0,020	1,5	0,015	1,0	0,010	1,5	0,015
			$i_{9n}$ Suporte para tomada de decisão	1,0	0,010	2,0	0,020	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010
			$i_{10n}$ Coordenação I4.0	1,0	0,010	1,5	0,015	1,0	0,010	1,0	0,010	2,0	0,020
$di_3$ Operações	4,0	0,80	$i_{11n}$ Descentralização	1,0	0,010	1,0	0,010	2,0	0,020	1,0	0,010	2,0	0,020
			$i_{12n}$ Virtualização	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010
			$i_{13n}$ Capacidade de análise	1,0	0,010	1,5	0,015	1,0	0,010	2,0	0,020	1,0	0,010
			$i_{14n}$ Operações em tempo real	1,0	0,010	2,0	0,020	2,0	0,020	2,0	0,020	2,0	0,020
$di_4$ Tecnologia e análise de dados	3,0	0,60	$i_{15n}$ TIC e segurança de dados	1,0	0,010	1,0	0,010	2,0	0,020	1,0	0,010	1,0	0,010
			$i_{16n}$ Tecnologias 4.0	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	2,0	0,020
			$i_{17n}$ Máquinas avançadas	1,0	0,010	1,5	0,015	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010
			$i_{18n}$ Flexibilidade	1,5	0,015	1,5	0,015	1,0	0,010	2,0	0,020	2,0	0,020
			$i_{19n}$ Inteligência artificial	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	1,5	0,015
			$i_{20n}$ Digitalização	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	1,0	0,010	2,0	0,020
Grau $mi$ por área				0,162		0,206		0,187		0,178		0,216	

### 3.5.4.2 Avaliação das dimensões em ME

No que diz respeito à avaliação da importância das oito dimensões *mme* analisadas pelos entrevistados, verificou-se que na perspectiva dos gerentes as dimensões que possuem maior importância para a melhoria dos índices de desempenho operacional foram *dme*<sub>1</sub> (visão de futuro), *dme*<sub>2</sub> (cultura), *dme*<sub>3</sub> (operações), *dme*<sub>4</sub> (qualidade), *dme*<sub>5</sub> (foco no cliente) e *dme*<sub>6</sub> (custos), todas com um valor de mediana igual a 4,0. A *dme*<sub>1</sub> concentra-se na organização das estratégias, no plano de negócios, assim como na própria implementação (SANTOS; TONTINI, 2018). De acordo com Bhasin (2008), essa dimensão é fundamental para as organizações, visto que se trata do planejamento de curto, médio e longo prazo. Desse modo, a capacidade de visualizar o futuro e de se antecipar às necessidades antes de os concorrentes é um fator crítico para o sucesso das organizações (SHENHAR; DVIR, 1996). A *dme*<sub>2</sub> se dedica às iniciativas voltadas à avaliação de desempenho, desenvolvimento e reconhecimento dos funcionários. A eficiência das PEs está fortemente ligada ao nível de treinamento que os funcionários possuem em relação a elas (YAUCH; STEUDEL 2002; ROTHSTEIN 2004; WOOD 2005; LONGONI *et al.*, 2013; PAKDIL; LEONARD 2014). Nesse sentido, é importante se considerar os aspectos relacionados às atividades de capacitação para se alcançar melhores índices de eficiência (BIRDI *et al.*, 2008; PAKDIL; LEONARD 2014). A *dme*<sub>3</sub> abrange o conjunto das principais PEs voltadas a uma melhor gestão operacional, tais como: *Just in time*, TPM e TRF. Segundo Arbós (2002), as PEs têm contribuído de forma intensa para a melhoria da flexibilidade e rapidez de resolução de problemas nas áreas produtivas. Assim, um maior grau de maturidade em ME tende a influenciar positivamente o desempenho operacional (CHAVEZ *et al.*, 2013; RASI *et al.*, 2015; SANTOS; TONTINI, 2018). A *dme*<sub>4</sub> representa a capacidade da organização em gerenciar o desempenho da qualidade, prevenir falhas, minimizar sucatas e controlar os custos ligados a qualidade. Essa dimensão aborda o conjunto de ações tomadas que visam atingir a qualidade perfeita. Erros devem ser detectados e corrigidos quando são gerados (SANTOS; TONTINI, 2018). O conceito da ME promove sistemas de produção altamente eficientes, que consomem menos recursos e geram maior qualidade (PETTERSEN, 2009). A *dme*<sub>5</sub> aborda como a organização determina os requisitos e expectativas do cliente, tais como: gestão de relacionamento, atendimento dos requisitos, customização e entrega. De acordo com Singh *et al.* (2010), todas as ações e planos nas organizações têm como objetivo final uma maior satisfação e fidelidade do cliente. A ME possui princípios e práticas que auxiliam as empresas na tarefa de se tornarem mais competitivas (SCHONBERGER, 2007). Nesse sentido, agregar valor aos olhos do cliente se constitui em um dos princípios fundamentais da ME (OHNO,



1988; SHAH; WARD, 2003; WOMACK; JONES, 2004; LAGE JUNIOR; FILHO, 2010; JASTI; KODALI, 2015). A  $dme_6$  abrange a administração dos custos diretos e indiretos relativos às atividades da empresa. A ME é um sistema de produção cujo um dos objetivos é a redução dos custos (OHNO, 1988). Nesse sentido, os desperdícios associados aos custos fixos diretos e indiretos também são combatidos (SWINK *et al.*, 2011). Segundo Karlsson e Åhlström (1996), as dimensões que determinam o desempenho da ME devem estar relacionadas a indicadores específicos, tais como: produtividade, qualidade, prazo de entrega e custo.

No tocante às dimensões  $dme_7$  (fornecedores) e  $dme_8$  (inventário), ambas receberam uma pontuação de 3,0 sendo as dimensões com uma menor importância de acordo com o ponto de vista dos gerentes. A  $dme_7$  engloba as iniciativas voltadas à gestão e desenvolvimento dos fornecedores. A relação entre empresa e fornecedor deve ser estratégica para a ME (WOMACK; JONES, 1990). Fornecedores confiáveis e com baixo *lead time* possibilitam a redução dos estoques dentro das organizações (SHAH; WARD, 2007). No entanto, variações em tempo e quantidade encontradas nas cadeias de suprimentos são um grande entrave para a ME. Nesse sentido, esforços precisam ser feitos para que se possa avançar nessa direção. Segundo Contreras e Mast (2001), relacionamentos de longo prazo e avaliação de fornecedores são aspectos importantes para a melhoria do relacionamento entre as organizações e seus fornecedores. A  $dme_8$  contempla as atividades relacionadas à gestão do inventário e do nivelamento da produção. De acordo com Zipkin (2000), um gerenciamento de inventário eficaz requer a avaliação de indicadores de desempenho, tais como: taxa de giro e nível de matéria-prima, material em processo e itens prontos. A ME combate o excesso de estoques e a superprodução (JAMES-MOORE; GIBBONS, 1997). Segundo Shah e Ward (2007), o nivelamento da produção auxilia na gestão do inventário, pois minimiza as flutuações de demanda. Desse modo, pode-se dizer que a ME auxilia a reduzir os custos relacionados ao controle de inventário (MASAAKI, 1986). Por fim, cabe destacar que de um modo geral a importância relativamente equilibrada entre a importância das dimensões em ME encontrada na empresa em questão denota uma implementação integrada oriunda de uma maior familiaridade com o tema da ME quando comparado com a I4.0.

Quadro 15 - Grau de maturidade *mme* por área

Dimensões ME ( <i>me</i> )	Med. <i>dme</i>	<i>dme</i>	Critérios ME ( <i>me<sub>kn</sub></i> )	Áreas produtivas									
				Conformação		Usinagem		Tratamento Térmico		Montagem		Expedição	
				Med. <i>me<sub>k1</sub></i>	<i>me<sub>k1</sub></i>	Med. <i>me<sub>k2</sub></i>	<i>me<sub>k2</sub></i>	Med. <i>me<sub>k3</sub></i>	<i>me<sub>k3</sub></i>	Med. <i>me<sub>k4</sub></i>	<i>me<sub>k4</sub></i>	Med. <i>me<sub>k5</sub></i>	<i>me<sub>k5</sub></i>
<i>dme<sub>1</sub></i> Visão de Futuro	4,0	0,80	<i>me<sub>k1n</sub></i> Planejamento estratégico	3,0	0,018	3,5	0,021	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,021
			<i>me<sub>k2n</sub></i> Plano de negócio	3,0	0,018	4,0	0,024	3,5	0,018	3,0	0,021	3,0	0,021
<i>dme<sub>2</sub></i> Cultura	4,0	0,80	<i>me<sub>k3n</sub></i> Política de reconhecimento dos funcionários	3,5	0,021	3,0	0,018	3,5	0,021	3,5	0,021	3,0	0,018
			<i>me<sub>k4n</sub></i> Trabalho em equipe	3,5	0,021	3,5	0,021	3,5	0,021	3,5	0,018	4,0	0,024
			<i>me<sub>k5n</sub></i> Desempenho da liderança	3,5	0,021	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,018	3,5	0,018
			<i>me<sub>k6n</sub></i> Programas de treinamento	3,5	0,021	4,0	0,024	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,018
			<i>me<sub>k7n</sub></i> Absenteísmo	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	2,0	0,012	3,5	0,021
			<i>me<sub>k8n</sub></i> Rotatividade	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,5	0,021
<i>dme<sub>3</sub></i> Operações	4,0	0,80	<i>me<sub>k9n</sub></i> Desempenho operacional	3,0	0,018	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,021	3,5	0,021
			<i>me<sub>k10n</sub></i> Padronização de processos	3,0	0,018	3,0	0,018	3,5	0,021	3,5	0,021	3,5	0,024
			<i>me<sub>k11n</sub></i> <i>Setups</i>	3,0	0,018	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,018	2,5	0,015
			<i>me<sub>k12n</sub></i> OEE	3,0	0,018	3,0	0,018	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,018
			<i>me<sub>k13n</sub></i> TPM	2,5	0,015	3,0	0,018	3,5	0,021	3,0	0,018	2,0	0,012
			<i>me<sub>k14n</sub></i> Manutenção preventiva	3,0	0,018	3,0	0,021	3,5	0,021	4,0	0,024	2,5	0,015
			<i>me<sub>k15n</sub></i> Segurança	4,5	0,026	4,5	0,026	4,5	0,026	4,0	0,024	4,5	0,026
			<i>me<sub>k16n</sub></i> Sistemas puxados	3,0	0,018	3,0	0,018	3,5	0,021	3,0	0,018	4,0	0,024
<i>me<sub>k17n</sub></i> Melhoria contínua	3,0	0,018	3,5	0,021	3,5	0,021	3,0	0,018	4,0	0,024			
<i>dme<sub>4</sub></i> Qualidade	4,0	0,80	<i>me<sub>k18n</sub></i> Desempenho da qualidade	2,5	0,015	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018
			<i>me<sub>k19n</sub></i> Sucata e retrabalho	2,5	0,015	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018
			<i>me<sub>k20n</sub></i> Custos da qualidade	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	2,5	0,015
			<i>me<sub>k21n</sub></i> Prevenção de falhas	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018
<i>dme<sub>5</sub></i> Foco no Cliente	4,0	0,80	<i>me<sub>k22n</sub></i> Gestão de relacionamento com o cliente	3,5	0,021	3,5	0,021	3,5	0,021	4,0	0,024	4,0	0,024
			<i>me<sub>k23n</sub></i> Satisfação dos clientes	4,0	0,024	4,0	0,024	3,0	0,021	4,0	0,024	3,5	0,021
			<i>me<sub>k24n</sub></i> Atender requisito dos clientes	2,5	0,015	4,0	0,024	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018
			<i>me<sub>k25n</sub></i> Entregas no prazo	2,5	0,015	4,0	0,024	4,0	0,024	4,0	0,024	4,5	0,026

<i>dme</i> <sub>6</sub> Custos	4,0	0,80	<i>mek</i> <sub>26n</sub> Custo de produção	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	4,0	0,021
			<i>mek</i> <sub>27n</sub> Custos gerais	3,0	0,018	3,0	0,018	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,018
			<i>mek</i> <sub>28n</sub> Redução dos custos	3,5	0,021	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,021	4,0	0,021
<i>dme</i> <sub>7</sub> Fornecedores	3,0	0,60	<i>mek</i> <sub>29n</sub> Parceria com fornecedores	3,0	0,021	4,0	0,024	3,0	0,018	3,0	0,018	4,0	0,021
			<i>mek</i> <sub>30n</sub> Seleção de fornecedores	3,0	0,018	3,00	0,018	2,0	0,012	3,0	0,018	4,0	0,024
			<i>mek</i> <sub>31n</sub> Envolvimento de fornecedores	3,0	0,018	3,0	0,018	2,0	0,012	2,0	0,012	3,5	0,021
<i>dme</i> <sub>8</sub> Inventário	3,0	0,60	<i>mek</i> <sub>32n</sub> Giro do inventário	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018	3,5	0,021
			<i>mek</i> <sub>33n</sub> Controle do estoque	3,5	0,021	3,5	0,021	3,5	0,021	3,0	0,021	4,0	0,024
			<i>mek</i> <sub>34n</sub> Nivelamento da produção	3,0	0,018	3,5	0,021	3,0	0,018	3,0	0,018	3,0	0,018
Grau <i>mme</i> por área				0,479		0,518		0,496		0,488		0,515	

### 3.5.4.3 Avaliação do grau de maturidade final e ranqueamento das áreas

O grau de maturidade  $mi_n$  e  $mme_n$  das diferentes áreas produtivas foi multiplicado entre si para definir o grau de maturidade  $mf_n$ , assim como seu respectivo valor normalizado de  $pmf_n$ . Nesse sentido, identificou-se que as áreas de Expedição e Usinagem estiveram sempre entre as duas áreas que apresentaram o maior grau de maturidade tanto em I4.0 quanto em ME. Particularmente, a área de Expedição obteve o maior valor de  $pmf(1,17)$  seguida da Usinagem (0,83), conforme mostra o Quadro 16. Em relação à área de Expedição, diversas evidências comprovando sua alta pontuação no grau de maturidade foram identificadas. No entanto, cabe destacar o alto potencial da área para conciliar ambas as abordagens (I4.0 e ME). A área dispõe de um sistema de gerenciamento de estoques (WMS) capaz de registrar todas as informações das tarefas e processos em tempo real. Nesse sentido, um grande volume de dados pode ser armazenado, podendo ser manuseado e facilitado por tecnologias, como: IoT, Big Data e CPS. Desse modo, conforme sugerido por Pagliosa e Tortorella (2019), IoT, CPS e Big Data são tecnologias que apresentam um alto grau de sinergia com algumas PEs que já estão implementadas na área da expedição, tais como: *kanban*, VSM e *kaizen*. Tais PEs estão associadas aos critérios ‘sistemas puxados’ ( $me_{16}$ ) e ‘melhoria contínua’ ( $me_{17}$ ), os quais obtiveram a maior pontuação na área de Expedição. Além disso, a área de Expedição possui um espaço físico que já passou por diversas melhorias propostas pelo uso de PEs, como o *kaizen* e VSM. Nesse sentido, o emprego de tecnologias capazes de analisar dados e identificar padrões, tais como: IoT e Big Data contempladas pela dimensão tecnologia e análise de dados ( $di_4$ ) que obteve alta pontuação na expedição, permite que ocorram novas otimizações no leiaute e no sistema *kanban* da área. Outro ponto positivo identificado pela pesquisa e ressaltado pelos supervisores da área, foi o fato de a Expedição possuir os menores índices de rotatividade e absenteísmo, representados pelos critérios  $me_7$  e  $me_8$  respectivamente. Tal resultado favorece a área em outros critérios importantes que também foram avaliados com um alto grau de maturidade tanto em I4.0, tais como: ‘compartilhamento do conhecimento’ ( $i_4$ ), ‘colaboração’ ( $i_5$ ) e ‘cultura flexível’ ( $i_6$ ) quanto em ME, a saber: ‘trabalho em equipe’ ( $me_4$ ) e ‘padronização de processos’ ( $me_{10}$ ). Por fim, vale destacar que tais critérios também já foram considerados como importantes por estudos anteriores tanto em I4.0 (LEYH *et al.*, 2016; PWC, 2016; SCHUMACHER *et al.*, 2016; SCHUH *et al.*, 2017), quanto em ME (DOOLEN; HACKER, 2005; BHASIN, 2008; MAASOUMAN; DEMIRLI, 2015; SANTOS; TONTINI, 2018).

No tocante ao grau de maturidade da área de Usinagem, cabe destacar que ela apresentou a maior pontuação em todos os critérios relacionados com a dimensão ‘visão de futuro’, tanto

em I4.0 ( $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ ) quanto em ME ( $me_1$  e  $me_2$ ). O entendimento do contexto atual, assim como a definição de uma visão de futuro correta é essencial para que a empresa obtenha sucesso com a I4.0 (PWC, 2016; SCHUH *et al.*, 2017). Da mesma forma, no que se refere à ME, uma visão de futuro adequada é fundamental, visto que esta trata do planejamento de curto, médio e longo prazo da organização (BHASIN, 2008). Uma das evidências identificadas a esse respeito foi o fato de a Usinagem ter sido uma das duas áreas que conseguiu apresentar um projeto visando à troca de dados com alguma tecnologia da I4.0. Atualmente, a área opera de forma conectada com uma rede de Intranet, permitindo a armazenagem e envio de informações em tempo real relativas a *setups*, desempenho operacional e manutenção para diferentes áreas da empresa, tais como: logística, engenharia e manutenção. Tal projeto está alinhado ao planejamento estratégico da empresa que visa integrar I4.0 e ME e também aos critérios pertencentes à dimensão visão de futuro, em I4.0 e ME. Outra justificativa para esta alta maturidade foi o fato de a Usinagem ter apresentado altas pontuações em outros critérios importantes tanto em I4.0, tais como: ‘treinamento voltado à I4.0’ ( $i_7$ ) e ‘liderança I4.0’ ( $i_8$ ) quanto em ME, tais como: ‘desempenho da liderança’ ( $me_5$ ) e ‘programas de treinamento’ ( $me_6$ ). Em relação às evidências apresentadas pela liderança para esses resultados, pode-se destacar que essa área foi a que possui o maior número de horas investidas em treinamento por funcionário. Além disso, o setor possui o maior percentual de funcionários que concluiu o programa interno de capacitação em ME, oferecido pela organização. Segundo Longoni *et al.* (2013) e Pakdil e Leonard (2014), o sucesso na implementação das PEs também está relacionado ao nível de treinamento que os funcionários possuem em relação a elas. No tocante à I4.0, pode-se destacar a participação de toda a liderança das áreas de Usinagem e Conformação em um treinamento especializado em I4.0. O treinamento abordou alguns temas relacionados às principais tecnologias da I4.0, integração da manufatura por meio da I4.0 e uso de robotização avançada. Essa iniciativa favorece positivamente a área, visto que as modernas tecnologias da I4.0 requerem profissionais qualificados. Além disso, a escassez de profissionais preparados é um obstáculo que preocupa as empresas podendo se tornar, inclusive uma limitação para a adoção da I4.0 (PWC, 2016; CNI, 2016). Nesse sentido, a estruturação de programas de treinamento onde os funcionários possam receber conhecimento voltado à I4.0 é fundamental. Segundo Gorecky *et al.* (2017), para que os funcionários cumpram suas tarefas com eficiência dentro de ambientes cada vez mais complexos da I4.0 se faz necessário medidas de qualificação adequadas nos níveis organizacional e tecnológico. É essencial que as empresas de manufatura capacitem os funcionários existentes a fazer uso adequado das novas tecnologias da I4.0 (CAPGEMINI CONSULTING 2015; DELOITTE, 2015).

Em relação à área com o menor grau de maturidade, a Conformação foi o setor que obteve a menor pontuação no índice *pmf* (-1,25). No total, a área obteve a menor pontuação em 15 dos 20 (75%) critérios avaliados em I4.0 e em 18 dos 34 (53%) critérios avaliados em ME. Diferentemente ao observado nas áreas de Expedição e Usinagem, a Conformação foi a área que apresentou o menor grau de maturidade em todos os critérios relacionados com a dimensão ‘visão de futuro’ tanto em I4.0 ( $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ ) quanto em ME ( $me_1$  e  $me_2$ ). Além disso, a área apresentou o menor valor de maturidade para quatro importantes critérios em ME, por exemplo, ‘desempenho da qualidade’ ( $me_{18}$ ), ‘sucata e retrabalho’ ( $me_{19}$ ), ‘atender requisito dos clientes’ ( $me_{24}$ ) e ‘entregas no prazo’ ( $me_{25}$ ). Vale destacar que a baixa maturidade nos critérios  $me_{19}$  e  $me_{25}$  corrobora com a informação apresentada pelos supervisores da conformação, sobre a área não estar em conformidade com o indicador de nível de sucata e retrabalho e percentual de entregas no prazo. Referente às evidências apresentadas pela liderança para o não atingimento do indicador de qualidade (associado ao critério  $me_{18}$ ), foram citados: dificuldade para atuar na causa raiz dos problemas de qualidade, defeitos em produtos ou componentes críticos e mistura de peças. Já em relação ao indicador de entregas no prazo (associado ao critério  $me_{24}$ ), as principais evidências apresentadas foram: atraso na entrega dos lotes e lotes com a quantidade de peças incorreta. Contudo, estudos anteriores demonstram que os aspectos relacionados aos critérios  $me_{18}$ ,  $me_{19}$ ,  $me_{24}$  e  $me_{25}$  são contemplados pela ME (SHAH; WARD, 2003; WOMACK *et al.*, 2007; LIKER; FRANZ, 2011; JASTI; KODALI, 2015). Já no tocante à maturidade em I4.0, pode-se destacar o alto grau de maturidade em I4.0 obtido pela Conformação nos critérios ‘compartilhamento do conhecimento’ ( $i_4$ ), ‘treinamento voltado à I4.0’ ( $i_7$ ) e ‘liderança I4.0’ ( $i_8$ ). Entre as evidências apresentadas pela área, tem-se o fato de esse setor possuir a liderança com a formação acadêmica e técnica mais alinhada em relação à I4.0, visto que 3 dos 8 (37%) respondentes possuíam formação na área de TIC. A formação desses líderes é considerada favorável, uma vez que a I4.0 está intimamente suportada pela adoção de novas tecnologias de informação, aumentando a necessidade das empresas por profissionais com tal capacitação (STOCK-HOMBURG, 2013). Por fim, evidenciou-se que a liderança da área de Conformação participou do mesmo treinamento especializado em I4.0 oferecida à Usinagem.

Posição	Áreas Produtivas	<i>mi</i>	<i>mme</i>	<i>mf</i>	<i>pmf</i>
1º	Expedição	0,216	0,515	0,111	<b>1,17</b>
2º	Usinagem	0,206	0,518	0,107	0,83
3º	Tratamento Térmico	0,187	0,496	0,093	-0,16
4º	Montagem	0,178	0,488	0,087	-0,59
5º	Conformação	0,162	0,479	0,078	<b>-1,25</b>

### 3.6 CONCLUSÕES E DIRECIONAMENTO PARA FUTURAS PESQUISAS

O presente trabalho apresentou método que permite a priorização da implementação da I4.0 e ME nas áreas produtivas em empresas de manufatura de acordo com o seu grau de maturidade. O método proposto foi ilustrado por meio de sua aplicação em uma empresa de grande porte, fabricante de peças para a indústria automobilística. Duas grandes contribuições podem ser destacadas neste estudo. Primeiramente, em termos teóricos, o método proposto permite medir de forma conjunta o grau de maturidade em I4.0 e ME em áreas produtivas. Tal avaliação se faz importante devido ao fato de muitas empresas, que já possuem a ME implementada, estarem iniciando a adoção da I4.0. Apesar disso, as organizações em geral apresentam dificuldades para compreensão dos princípios e conceitos da I4.0. (SANDERS *et al.*, 2016; EROL *et al.*, 2016). Alguns modelos existentes na literatura se propuseram a avaliar de forma isolada o grau de maturidade em I4.0 (p. ex., ANDERL, 2014; CHUKWUEKWE *et al.*, 2016; GANZARAIN; ERRASTI, 2016; LEYH *et al.*, 2016; PWC, 2016; SCHUMACHER *et al.*, 2016; TONELLI *et al.*, 2016; LEYH *et al.*, 2017; SCHUH *et al.*, 2017; GHOBAKHLOO, 2018). Da mesma forma, pode-se encontrar modelos de maturidade destinados exclusivamente à ME (p.ex., DOOLEN; HACKER, 2005; BHASIN, 2008; HAMDI; LEITE, 2012; ALBLIWI *et al.*, 2014; PAKDIL; LEONARD, 2014; MAASOUMAN; DEMIRLI, 2015; VERRIER *et al.*, 2016; SANTOS; TONTINI, 2018). Contudo, se desconhece a existência de um modelo que avalie de forma integrada e quantitativamente o grau de maturidade em I4.0 e ME. Assim, esta pesquisa complementa o corpo de conhecimento voltado à I4.0 e ME a partir da proposição do método de maturidade descrito.

Em termos práticos, a integração da I4.0 às abordagens de gestão, tal como a ME, ainda é incipiente na maior parte das organizações. De acordo Kolberg *et al.* (2016) e Gjeldum *et al.* (2016), há uma falta de estudos que investigam empiricamente a implementação entre a ME e a I4.0. Por meio da determinação do grau de maturidade em I4.0 e ME, torna-se possível identificar as áreas da empresa mais propensas à implementação de ambas as abordagens. Assim, o método proposto auxilia a direcionar a integração da I4.0 com a ME, propiciando aos

gestores das empresas argumentos e evidências para priorizar sua implementação. Os resultados desta pesquisa possibilitam às organizações conduzirem uma implementação de modo mais assertivo, reduzindo esforços e investimentos desnecessários.

Quanto às limitações deste estudo, cabe destacar alguns pontos relevantes. Primeiro, os resultados aqui obtidos não podem ser generalizáveis às demais empresas manufatureiras, que visam à implementação concomitante da I4.0 e ME, já que existem diferentes contextos e particularidades nas organizações que precisam ser observadas. Sugere-se como oportunidade para futuras pesquisas a aplicação do método proposto em organizações de diferentes segmentos, possibilitando a verificação de sua aplicabilidade e generalização. Segundo, a pesquisa avaliou o grau de maturidade tanto em I4.0 quanto em ME de cinco áreas produtivas. Contudo, o método aplicado não examinou o impacto dessa associação sobre o resultado do desempenho operacional dessas áreas. Nesse sentido, por mais que o grau de maturidade sugira que uma determinada área tenha uma maior pré-disposição para integrar I4.0 e ME, não se pode assegurar que ela também irá obter melhorias significativas no seu desempenho. Estudos futuros podem incluir o desempenho operacional das áreas como uma variável a ser analisada, relacionando-a ao grau de maturidade identificado.



## REFERÊNCIAS

- ABDULMALEK, F. A.; RAJGOPAL, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. **International Journal of Production Economics**, v. 107, n. 1, p. 223-236, 2007.
- ADEYERI, M. K.; MPOFU, K.; OLUKOREDE, T. A. Integration of agent technology into manufacturing enterprise: A review and platform for industry 4.0. **Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), 2015 International Conference**, p. 1-10, 2015.
- ALIAS, C.; SALEWSKI, U.; RUIZ, V. E. O.; OLALLA, F. E. A.; REYMÃO, J. D. E. N.; NOCHE, B. Adapting warehouse management systems to the requirements of the evolving era of Industry 4.0. **12<sup>th</sup> International Manufacturing Science and Engineering Conference, 6<sup>th</sup> International Conference on Materials and Processing**. v. 3, p. 04-051, 2017.
- ACHANGA, P.; SHEHAB, E.; ROY, R.; NELDER, G. Critical success factors for lean implementation within SMEs. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 17, n. 4, p. 460-471, 2006.
- ALBLIWI, S. A.; ANTONY, J.; ARSHED, N. Critical literature review on maturity models for business process excellence. **Industrial Engineering and Engineering Management**, p. 79-83, 2014.
- ALMADA-LOBO, F. The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES). **Journal of Innovation Management**, v. 3, n. 4, p. 16-21, 2016.
- ANDERL, R. Industrie 4.0: Advanced engineering of smart products and smart production. **Proceedings of International Seminar on High Technology**, v. 19, 2014.
- ARBÓS, L. C. Design of a rapid response and high efficiency service by lean production principles: Methodology and evaluation of variability of performance. **International Journal of Production Economics**, v. 80, n. 2, p. 169-183, 2002.
- BABBIE, Earl. **Métodos de Pesquisa de Survey**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 1999.
- BAHRIN; MOHD AIMAN KAMARUL; MOHD FAUZI OTHMAN; NH NOR AZLI; MUHAMAD FARIHIN TALIB. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. **Jurnal Teknologi**, v.78, n. 6-13, p. 137-143, 2016.
- BAUER, W.; POKORNI, B.; FINDEISEN, S. Production assessment 4.0—methods for the development and evaluation of industry 4.0 use cases. **International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics**, p. 501-510, 2018.
- BECKER, J.; KNACKSTEDT, R.; PÖPPELBUß, J. Developing maturity models for IT management. **Business & Information Systems Engineering**, v.1, n. 3, p. 213-222, 2009.
- BETTIOL, M.; CAPESTRO, M.; DI MARIA, E. Industry 4.0: the strategic role of marketing. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2017.

BHASIN, S. Lean and performance measurement. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 19, n.5, p. 670-684, 2008.

BIRDI, K.; CLEGG, C.; PATTERSON, M.; ROBINSON, A.; STRIDE, C. B.; WALL, T. D.; WOOD, S. J. The impact of human resource and operational management practices on company productivity: A longitudinal study. **Personnel Psychology**, v. 61, n. 3, p. 467-501, 2008.

CAPGEMINI CONSULTING, 2015. **Industry 4.0 the Capgemini Consulting View** Disponível em: [https://www.de.capgemini-consulting.com/resource-file-access/resource/pdf/capgemini-consulting-industrie-4.0\\_0.pdf](https://www.de.capgemini-consulting.com/resource-file-access/resource/pdf/capgemini-consulting-industrie-4.0_0.pdf). Acesso em: 30 ago. 2019.

CHAVEZ, R.; GIMENEZ, C.; FYNES, B.; WIENGARTEN, F.; YU, W. Internal lean practices and operational performance: The contingency perspective of industry clockspeed. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 33, n. 5, p. 562-588, 2013.

CHUKWUEKWE, D. O.; SCHJOLBERG, P.; RODSETH, H.; STUBER, A. Reliable, robust and resilient systems: towards development of a predictive maintenance concept within the industry 4.0 environment, **EFNMS Euro Maintenance Conference**, 2016.

CNI, BRAZIL'S NATIONAL CONFEDERATION OF INDUSTRY, Industry 4.0: a new challenge for Brazilian industry, **CNI Indicators**, v. 17, n. 2, 2016.

CONTRERAS, L.; MAST, M. **LEAN STRATEGIES GROUP LLC**. (2001).

DELOITTE, 2015. **Industry 4.0 Challenges and Solutions for the Digital Transformation and Use of Exponential Technologies** Disponível em: <https://www2.deloitte.com/ch/en/pages/manufacturing/articles/manufacturing-study-industry-4.html>. Acesso em: 30 ago. 2019.

DOOLEN, T. L.; HACKER, M. E. A review of lean assessment in organizations: an exploratory study of lean practices by electronics manufacturers. **Journal of Manufacturing systems**, v. 24, n. 1, p. 55-67, 2005.

GLIGOR, D. M.; HOLCOMB, M. C. Understanding the Role of Logistics Apabilities in Achieving Supply Chain Agility: A Systematic Literature Review, **Supply Chain Management**, v. 17, 2012.

HAMDI, O.; LEITE, F. BIM and lean interactions from the BIM capability maturity model perspective: a case study. In: **20th Conference of the International Group for Lean Construction**, 2012.

HECKLAU; FABIAN; MILA GALEITZKE; SEBASTIAN FLACHS; HOLGER KOHL. Holistic approach for human resource management in Industry 4.0. **Procedia Cirp**, v. 54, p. 1- 6, 2016.

GANZARAIN, J.; ERRASTI, N. Three stage maturity model in SME's towards Industry 4.0. **Journal of Industrial Engineering and Management**. v. 9, n. 5, p. 1119-1128, 2016.

- GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: A strategic roadmap toward industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 29, n. 6, p. 910-936, 2018.
- GOECKY, D.; KHAMIS, M.; MURA, K. Introduction and establishment of virtual training in the factory of the future. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 30, n. 1, p. 182-190, 2017.
- HÄGG, G. M. Corporate initiatives in ergonomics an introduction. **Applied Ergonomics**, v. 34, n. 1, p. 3-15, 2003.
- JAMES-MOORE, S. M.; GIBBONS, A. Is lean manufacture universally relevant? An investigative methodology. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 17, n. 9, p. 899-911, 1997.
- JAIN, A.; BHATTI, R. S.; SINGH, H. OEE enhancement in SMEs through mobile maintenance: a TPM concept. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 32, n. 5, p. 503-516, 2015.
- KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; HELLINGER, A.; WAHLSTER, W. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; Final report of the Industrie 4.0. Working Group. **Forschungsunion**, 2013.
- KARLSSON, C.; ÅHLSTRÖM, P. Assessing changes towards lean production. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 16, n. 2, p. 24-41, 1996.
- KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. **IFAC-Papers Online**, v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.
- KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 10, p. 2845-2856, 2017.
- KOTHARI, C. R. **Research methodology: Methods and techniques**. New Age International, 2004.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.
- LEYH, C.; SCHÄFFER, T.; BLEY, K.; FORSTENHÄUSLER, S. Assessing the IT and software landscapes of Industry 4.0-Enterprises: the maturity model SIMMI 4.0. **Information Technology for Management: New Ideas and Real Solutions**, p. 103-119, Springer, Cham, 2016.
- LEYH, C.; BLEY, K.; SCHÄFFER, T.; BAY, L. The Application of the Maturity Model SIMMI 4.0 in Selected Enterprises. **Proceedings of 23rd Americas Conference on Information Systems**, 2017.

- LONGONI, A.; PAGELL, M.; JOHNSTON, D.; VELTRI, A. When does lean hurt?—an exploration of lean practices and worker health and safety outcomes. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 11, p. 3300-3320, 2013.
- MAASOUMAN, M. A.; DEMIRLI, K. Assessment of lean maturity level in manufacturing cells. **IFAC-Papers Online**, v. 48, n. 3, p. 1876-188, 2015.
- MARTINS, R. A. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. *In*: CAUCHICK, M. P. A. et al. (organizador). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.
- MASAAKI, I. **Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success**. New York, Ltd: Mc Graw-Hill, 1986.
- MUÑOZ-VILLAMIZAR, A.; SANTOS, J.; MONTOYA-TORRES, J. R.; JACA, C. Using OEE to evaluate the effectiveness of urban freight transportation systems: A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 197, p. 232-242, 2018.
- NETLAND, T. H.; ALFNES, E. Proposing a quick best practice maturity test for supply chain operations. **Measuring business excellence**, v. 15, n.1, p. 66-76, 2011.
- NETLAND, T.; KASRA, F. What to expect from corporate lean programs. **MIT Sloan Management Review** v.55, n. 4, p. 83, 2014.
- NIGHTINGALE, D. J.; MIZE, J. H. Development of a lean enterprise transformation maturity model. **Information Knowledge Systems Management**, v. 3, n. 1, p. 15-30, 2002.
- PAGLIOSA, M.; TORTORELLA, G. Práticas Lean e Tecnologias da Indústria 4.0 no Contexto das Empresas de Manufatura. **Seminário Sistemas Lean**, v.1, p. 205-211, 2019.
- PAKDIL, F.; LEONARD, K. M. Criteria for a lean organisation: development of a lean assessment tool. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 15, p. 4587-4607, 2014.
- PARKES, A.; DAVERN, M. A challenging success: a process audit perspective on change. **Business Process Management Journal**, v. 17, n.6, p. 876-897, 2011.
- PETTERSEN, J. Defining lean production: some conceptual and practical issues. **The TQM journal**, v. 21, n. 2, p. 127-142, 2009.
- POKORNI, B.; SCHLUND, S.; FINDEISEN, S.; TOMM, A.; EUPER, D.; MEHL, D.; BREHM, N.; AHAMD, D.; OHLHAUSEN, P.; PALM, D. **Produktionsassessment 4.0. Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb**, v. 112, n. 1-2, p. 20-24, 2017.
- POWELL, D.; RIEZEBOS, J.; STRANDHAGEN, J. O. Lean production and ERP systems in small-and medium-sized enterprises: ERP support for pull production. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 2, p. 395-409, 2013.
- PWC. **2016 Global industry 4.0 Survey: Building the digital dnterprise, 2016**. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industry-4.0.html/>. Acesso em: 4 out. 2018.

RADZIWON, A.; BILBERGA, A.; BOGERSA, M.; MADSEN, E.S. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. **International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation**, v. 69, p. 1184-1190, 2014.

RASI, R. Z. R.; RAKIMAN, U. S.; AHMAD, M. F. B. Relationship between lean production and operational performance in the manufacturing industry. **IOP conference series: Materials science and engineering** v. 83, n. 1, p. 012016, 2015.

ROTHSTEIN, J. S. Creating lean industrial relations: general motors in Silao, **Mexico. Competition & Change**, v. 8, n. 3, p. 203-221, 2004.

SANTOS, B. G.; TONTINI, G. Developing an instrument to measure lean manufacturing maturity and its relationship with operational performance. **Total Quality Management & Business Excellence** v. 29, n. 9-10, p. 977-995, 2018.

SCHMIDT, R.; MÖHRING, M.; HÄRTING, R.; REICHSTEIN, C.; NEUMAIER, P.; JOZINOVIĆ, P. Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results, **Proceedings of International Conference on Business Information Systems, Springer, Cham**, 2015.

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

SEPPÄLÄ, P.; SOILI, K. How do employees perceive their organization and job when companies adopt principles of lean production? **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries** v. 14, n. 2, p. 157-180, 2004.

SHENHAR, A. J.; DOV, D. Toward a typological theory of project management. **Research policy** 25, n. 4, p. 607-632, 1996.

SINGH, B.; GARG, S. K.; SHARMA, S. K. Development of index for measuring leanness: study of an Indian auto component industry. **Measuring Business Excellence**, v. 14, n. 2, p. 46-53, 2010.

STOCK-HOMBURG, R. Zukunft der Arbeitswelt 2030 als Herausforderung des Personalmanagements. In: **Handbuch Strategisches Personalmanagement**, p. 603-629, 2013.

TONELLI, F.; DEMARTINI, M.; LOLEO, A.; TESTA, C. A novel methodology for manufacturing firms value modeling and mapping to improve operational performance in the industry 4.0 era. **Procedia CIRP**, v. 57, p. 122-127, 2016.

TORTORELLA, G.; FOGLIATTO, F. Method for assessing human resources management practices and organizational learning factors in a company under lean manufacturing implementation. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 15, p. 4623-4645, 2014.

TORTORELLA, G.; GIGLIO, R.; VAN DUN, D. H. Industry 4.0 as a moderator on the relationship between lean and operational performance. In: **25<sup>th</sup> International Annual EurOMA Conference: To serve, to produce and to servitize in the era of networks, big data and analytics**, 2018.

TORTORELLA, G.; VERGARA, L.; FERREIRA, E. Lean manufacturing implementation: an assessment method with regards to socio-technical and ergonomics practices adoption. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 9-12, p. 3407-3418, 2017.

VERRIER, B.; ROSE, B.; CAILLAUD, E. Lean and green strategy: the Lean and green House and maturity deployment model. **Journal of Cleaner Production**, v. 116, p. 150-156, 2016.

YAUCH, C. A.; STEUDEL, H. J. Cellular manufacturing for small businesses: key cultural factors that impact the conversion process. **Journal of Operations Management**, v. 20, n. 5, p. 593-617, 2002.

WAN, H. D.; FRANK CHEN, F. A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 23, p. 6567-6584, 2008.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. Lean thinking - banish waste and create wealth in your corporation. **Journal of the Operational Research Society**, v. 48, n. 11, p. 1148-1148, 1997.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A mentalidade enxuta nas empresas: Elimine o desperdício e crie riqueza**, 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A máquina que mudou o mundo**. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

WOOD, S. J. 2005. Organizational Performance and Manufacturing Practices. In: **The Essentials for the New Workplace**, p. 197-218, 2005.

ZIPKIN, P. H. **Foundations of inventory management**. Boston: Mc Graw-Hill, 2000.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitas organizações de manufatura têm adotado a ME como uma forma eficiente de obter melhores resultados e tornar-se e mais competitiva. A partir do surgimento da I4.0, um novo modelo de gestão baseado em modernas tecnologias capazes de promover uma integração entre toda a cadeia de valor está sendo configurado. A integração promovida pela I4.0 pode alterar significativamente as cadeias produtivas, seus modelos de negócio e processos existentes (SCHMIDT *et al.*, 2015). A compreensão a respeito do relacionamento entre a I4.0 e ME pode ser de grande auxílio para as organizações que visam uma implementação mais assertiva de ambas abordagens. Nesse contexto, esta dissertação teve por objetivo principal analisar como ocorre a integração entre a I4.0 e ME em empresas manufatureiras. Para tal, outros três objetivos específicos foram traçados: (i) identificação das principais tecnologias da I4.0 e PEs; (ii) examinar o grau de sinergia entre as tecnologias da I4.0 e PEs; e (iii) propor um método de avaliação que permite priorizar a implementação da I4.0 e ME nas áreas produtivas de empresas manufatureiras de acordo com o grau de maturidade.

Os objetivos específicos (i) e (ii) foram contemplados na Fase 1 desta pesquisa. Quanto à identificação das principais tecnologias da I4.0 e PEs, nove tecnologias e quatorze PEs foram identificadas por meio de uma revisão de literatura, baseada em um PB composto por 93 artigos. Com base nessa identificação propôs-se classificar o grau de sinergia entre essas tecnologias e PEs, baseada em três critérios: (a) frequência de citação das tecnologias da I4.0 e PEs; (b) aplicação das tecnologias e PEs nos diferentes níveis do fluxo de valor; e (c) relevância das evidências encontradas na literatura. A análise de 126 interações demonstrou que existe um potencial a ser explorado, visto que 72 (57%) delas foram classificadas de média sinergia e 24 (19%) como alta sinergia. Tal resultado demonstra uma relação favorável e de compatibilidade entre a grande maioria das tecnologias e PEs, visto que essas interações tendem a funcionar de uma forma construtiva para a melhoria dos resultados.

Já o objetivo (iii), abordado na Fase 2 deste trabalho, foi atingido a partir da proposição de um método estruturado, que possibilita identificar e priorizar a implementação da I4.0 e ME nas áreas produtivas de empresas manufatureiras para a melhoria do desempenho. Assim, o método proposto foi aplicado em uma empresa de grande porte do setor automotivo, que já vem implementando a ME há mais de 10 anos, e que apresenta iniciativas de integração das tecnologias da I4.0. O método foi aplicado em cinco áreas produtivas selecionadas a partir de três requisitos: (a) experiência com PEs; (b) controle de desempenho operacional; e (c) capacidade e viabilidade para a troca de dados em rede. Como resultado deste trabalho, foi possível

identificar o grau de maturidade em I4.0 e ME nas diferentes áreas produtivas da empresa. Tal identificação pode auxiliar as organizações a priorizar os esforços de melhoria de forma mais holística, considerando as características de ambas abordagens.

Em relação às contribuições teóricas, na Fase 1 por meio de uma revisão de literatura composta por um PB de 93 artigos, a pesquisa identificou as principais tecnologias da I4.0 e PEs, suas características e aplicações nos diferentes níveis de valor. Além disso, foi possível classificar o grau de sinergia e dissonância presentes nas 126 interações entre essas tecnologias e as PEs. Já na Fase 2, o trabalho propôs um método estruturado em dimensões e critérios consolidados na literatura, que permitiu avaliar de forma concomitante a maturidade em I4.0 e ME em áreas produtivas. Vale destacar que até o momento, desconhece-se a existência de um outro modelo que permita uma avaliação em I4.0 e ME de forma conjunta e de modo quantitativo. Nesse sentido, o conhecimento oferecido por esta pesquisa pode ser de grande importância para o contexto das empresas manufatureiras, visto que geralmente as organizações apresentam dificuldades para assimilar os princípios e conceitos da I4.0 (SANDERS *et al.*, 2016; EROL *et al.*, 2016). Além disso, muitas organizações que adotaram a ME e suas PEs começam a buscar também uma implementação em I4.0 como parte de uma estratégia para se elevar a competitividade. Assim, esta pesquisa oferece contribuições para robustecer o corpo de conhecimento no que tange à integração da I4.0 e ME.

No tocante às contribuições práticas, na Fase 1 os resultados indicam que as empresas em implementação da ME e que desejam se beneficiar da I4.0, devem de preferência investir seus esforços na adoção de tecnologias que possuem um maior número de relacionamentos de alta sinergia com as PEs tais como o IoT e CPS, visto que elas oferecem uma maior probabilidade para fornecer resultados de curto prazo. De modo oposto, a robotização avançada não deve ser priorizada devido ao seu nível limitado de sinergia com as PEs. Outras tecnologias cuja conceituação e aplicação ocorreram antes do surgimento formal da I4.0, como a simulação, podem ter perdido sua novidade, reduzindo seu interesse de pesquisa. No entanto, esse fato não significa que a simulação seja aplicada extensivamente na manufatura, uma vez que pode haver diferentes formas de utilizá-la em sistemas de produção e processos de fabricação que possam convergir para os objetivos da ME. Já na fase Fase 2, o trabalho contribui com a proposição de um método que permite às organizações identificar por meio do grau de maturidade, quais áreas são mais propensas a uma implementação concomitante em I4.0 e ME. Tal conhecimento fornece aos gerentes, argumentos e evidências importantes para que eles possam priorizar ações e identificar demandas relacionadas a uma implementação concomitante e bem-sucedida em ambas as abordagens. Parkes e Davern (2011) afirmam que os modelos de maturidade são



importantes indicadores do nível organizacional e podem auxiliar a criar um roteiro para melhorias. Assim, a identificação do grau de maturidade em I4.0 e ME pode auxiliar as organizações a conduzirem uma implementação mais assertiva e que permita gerar resultados de forma mais rápida. Por fim, vale destacar que uma implementação mais abrangente que considere o grau de maturidade em diferentes áreas, assim como as características da I4.0 e ME possui maiores chances de se consolidar e de ser bem-sucedida.

Em referência às oportunidades para futuras pesquisas, na Fase 1 o presente estudo se propôs a medir o nível de sinergia existente nas interações entre as principais tecnologias da I4.0 e PEs, valendo-se de três critérios conceituais estabelecidos, por meio de uma revisão de literatura. Assim, uma validação empírica sobre o nível de sinergia entre as tecnologias e PEs ainda precisa ser realizada e possibilitaria comprovar as proposições deste estudo, assim como fornecer resultados e evidências capazes de aprimorar o método. Além disso, à medida que o nível de entendimento sobre o tema melhora, pode-se aprimorar o levantamento das aplicações das tecnologias e PEs dentro dos diferentes níveis do fluxo de valor (intracelular, macroprocessos e cadeia de suprimentos). Nesse sentido, futuros trabalhos poderiam verificar a aplicabilidade, assim como a generalização do método proposto em empresas pertencentes a outros segmentos. No tocante à Fase 2 da pesquisa, apesar de o método ter sido aplicado em áreas produtivas de uma empresa manufatureira, não foi possível se construir uma relação entre o grau de maturidade e o resultado do desempenho operacional dessas áreas. Assim, mesmo que o grau de maturidade aponte que uma determinada área possui um alto grau de maturidade e uma alta propensão para receber iniciativas voltadas à I4.0 e ME, não se pode garantir que a mesma área irá apresentar os melhores resultados no que tange ao desempenho operacional. Nesse sentido, sugere-se que estudos futuros examinem as relações existentes entre o grau de maturidade em I4.0 e ME e o resultado de desempenho operacional em áreas produtivas.

## REFERÊNCIAS

EROL, S.; JAGER, A.; HOLD, P.; OTT, K; SIHN, W. Tangible industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. **Proceedings of 6<sup>th</sup> Conference on Learning Factories**, v. 54, p. 13-18, 2016.

PARKES, A.; DAVERN, M. A challenging success: a process audit perspective on change. **Business Process Management Journal**, v. 17, n.6, p. 876-897, 2011.

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

SCHMIDT, R.; MÖHRING, M.; HÄRTING, R.; REICHSTEIN, C.; NEUMAIER, P.; JOZINOVIĆ, P. Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results, **Proceedings of International Conference on Business Information Systems**, Springer, Cham, 2015.

## APÊNDICE A – PB FINAL

ARTIGOS DO PB	
1	ADEYERI, M. K.; MPOFU, K.; OLUKOREDE, T. A. Integration of agent technology into manufacturing enterprise: A review and platform for industry 4.0. In: <b>Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), 2015 International Conference</b> , p. 1-10, 2015.
2	ALIAS, C.; SALEWSKI, U.; RUIZ, V. E. O.; OLALLA, F. E. A.; REYMÃO, J. D. E. N.; NOCHE, B. Adapting Warehouse Management Systems to the Requirements of the Evolving Era of Industry 4.0. <b>Proceedings 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference</b> , p. 1-14, 2017.
3	ALMADA-LOBO, F. The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES). <b>Journal of Innovation Management</b> , v. 3, n. 4, p. 16-21, 2016.
4	ANG, J. H.; GOH, C.; LI, Y. Smart design for ships in a smart product through-life and industry 4.0 environment. <b>Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on</b> , p. 5301-5308, 2016.
5	ARNOLD, C.; KIEL, D.; VOIGT, K. I. How the industrial internet of things changes business models in different manufacturing industries. <b>International Journal of Innovation Management</b> , v. 20, n. 8, p. 1640015, 2016.
6	AYDOS, T. F.; FERREIRA, J. C. RFID-based system for lean manufacturing in the context of internet of things. <b>Automation Science and Engineering International Conference</b> , p. 1140-1145, 2016.
7	BAGHERI, B.; YANG, S.; KAO, H. A.; LEE, J. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. <b>IFAC-Papers online</b> , v. 48, n. 3, p. 1622-1627, 2015.
8	BASSI, L. Industry 4.0: Hope, hype or revolution?. <b>Research and Technologies for Society and Industry</b> , p. 1-6, 2017.
9	BHAMU J.; SINGHK. Lean manufacturing: literature review and research issues. <b>International Journal of Operations Product Management</b> , v. 34, n. 7, p. 876-940, 2014.
10	BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. <b>International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering</b> , v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.
11	BRETTEL, M.; KLEIN, M.; FRIEDERICHSEN, N. The relevance of manufacturing flexibility in the context of Industrie 4.0. <b>Procedia CIRP</b> , v. 41, p. 105-110, 2016.
12	BROY, M.; CENGARLE, M. V.; GEISBERGER, E. Cyber-physical systems: imminent challenges. In: <b>Monterey workshop</b> , p. 1-28, 2012.
13	BUTZER, S.; KEMP, D.; STEINHILPER, R.; SCHOTZ, S. Identification of approaches for remanufacturing 4.0. In: <b>European Technology and Engineering Management Summit</b> , p. 1-6, 2016.
14	CHEN, J. Y.; TAI, K. C.; CHEN, G. C. Application of Programmable Logic Controller to Build-up an Intelligent Industry 4.0 Platform. <b>Procedia CIRP</b> , v. 63, p. 150-155, 2017.
15	CHIANG, Y.; LEE, D. Smart manufacturing with the Internet of makers. <b>Journal of the Chinese Institute of Engineers</b> , v. 40, n. 7, p. 585-592, 2017.
16	CHROMJAKOVÁ, F.; BOBÁK, R.; HRUSECKA, D. Production process stability–core assumption of industry 4.0 concept. <b>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</b> , v. 215, n. 1, p. 012024, 2017.
17	DAVE, B.; KUBLER, S.; FRÄMLING, K.; KOSKELA, L. Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards. <b>Automation in construction</b> , v. 61, p. 86-97, 2016.
18	DOH, S. W.; DESCHAMPS, F.; DE LIMA, E. P. Systems integration in the lean manufacturing systems value chain to meet industry 4.0 requirements. In: <b>ISPE TE</b> , p. 642-650, 2016.
19	DOMBROWSKI, U.; RICHTER, T.; KRENKEL, P. Interdependencies of industrie 4.0 & lean production systems: A use cases analysis. <b>Proceedings of 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing</b> , v. 11, p. 1061-1068, 2017.
20	DUGENSKA, A.; LOUCHEZ, A. The factory of the future will be shaped by the Internet of things. <b>Manufacturing Net</b> , v. 19, 2014.
21	EDWARDS, P.; RAMIREZ, P. When should workers embrace or resist new technology?. <b>New technology, work and employment</b> , v. 31, v. 2, p. 99-113, 2016.

22	ELEFThERiADiS, M. S. R. J.; MYKLEBUST, O. A guideline of quality steps towards zero defect manufacturing in Industry. In: <b>2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management</b> , 2016.
23	EROL, S.; JAGER, A.; HOLD, P.; OTT, K.; SIHN, W. Tangible industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. <b>Proceedings of 6<sup>th</sup> Conference on Learning Factories</b> , v. 54, p. 13-18, 2016.
24	ESMAEILIAN, B.; BEHDAD, S.; WANG, B. The evolution and future of manufacturing: A review. <b>Journal of Manufacturing Systems</b> , v. 39, p. 79-100, 2016.
25	FERA, M.; MACCHIAROLI, R.; FRUGGIERO, F.; LAMBIASE, A.; MIRANDA, S. Application of a business process model (BPM) method for a warehouse RFID system implementation. <b>International Journal of RF Technologies</b> , v. 8, n. 1-2, p. 57-77, 2017.
26	FERRERA, E.; ROSSINI, R.; BAPTISTA, A. J.; EVANS, S.; HOVEST, G. G.; HOLGADO, M.; LEZAK, E.; LOURENÇO, E. J.; MASLUSZCZAK, Z.; SCHNEIDER, A.; SILVA, E. J.; WERNER-KYTOLA, O. Toward industry 4.0: Efficient and sustainable manufacturing leveraging maestri total efficiency framework. <b>International Conference on Sustainable Design and Manufacturing</b> , p. 624-633, 2017.
27	FLEISCH, E.; WEINBERGER, M.; WORTMANN, F. Business models and the internet of things. <b>Interoperability and Open-Source Solutions for the Internet of Things</b> , p. 6-10, 2015.
28	GAO, Q.; SHI, R.; WANG, G. Construction of intelligent manufacturing workshop based on lean management. <b>Procedia CIRP</b> , v. 56, p. 599-603, 2016.
29	GIAIMO, F.; YIN, H.; BERGER, C.; CRNKOVIC, I. Continuous experimentation on cyber-physical systems: challenges and opportunities. <b>Proceedings of the Scientific Workshop Proceedings of XP 2016</b> , p. 14, 2016.
30	GRONAU, N. Determinants of an appropriate degree of autonomy in a cyber-physical production system. <b>Proceedings of 52<sup>th</sup> Changeable, Agile, Reconfigurable &amp; Virtual Production</b> , v. 52, p. 1-5, 2016.
31	ILLÉS, B.; TAMÁS, P.; DOBOS, P.; SKAPINYEZ, R. New challenges for quality assurance of manufacturing processes in Industry 4.0. <b>Solid State Phenomena</b> , v. 261, p. 481-486, 2017.
32	KARAKOSE, M.; YETIS, H. A Cyberphysical System Based Mass-Customization Approach with Integration of Industry 4.0 and Smart City. <b>Wireless Communications and Mobile Computing</b> , 2017.
33	KERN, W.; RUSITSCHKA, F.; KOPYTYNSKI, W.; KECKL, S.; BAUERNHANSL, T. Alternatives to assembly line production In the Automotive Industry. In: <b>The 23<sup>rd</sup> International Conference on Production Research</b> , p. 1-9, 2015.
34	KIBIRA, D.; MORRIS, K.; KUMARAGURU, S. Methods and tools for performance assurance of smart manufacturing systems. <b>National Institute of Standards and Technology</b> , v. 121, p. 281-313, 2015.
35	KIEL, D.; MULLER, J. M.; ARNOLD, C.; VOIGT, K. I. Sustainable industrial value creation: benefits and challenges of industry 4.0. <b>International Journal of Innovation Management</b> , v. 21, n. 8, p. 1740015 2017.
36	KIRAZLI, A.; HORMANN, R. A conceptual approach for identifying Industrie 4.0 application scenarios. <b>IIE Annual Conference. Proceedings</b> , p. 862, 2015.
37	KOLBERG, D.; BERGER, C.; PIRVU, B. C.; FRANKE, M.; MICHNIEWICZ, J. Insights from a framework for designing cyber-physical systems in production environments. <b>Proceedings of the 49<sup>th</sup> Conference on Manufacturing Systems</b> , v. 57, p. 32-37, 2016.
38	KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. <b>International Journal of Production Research</b> , v. 55, n. 10, p. 2845-2856, 2017.
39	KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. <b>IFAC-Papers On line</b> , v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.
40	KOURI, I. A.; SALMIMAA, T. J.; VILPOLA, I. H. The principles and planning process of an electronic kanban system. <b>Novel algorithms and techniques in telecommunications, automation and industrial electronics</b> . p. 99-104, 2010.
41	KUSTERS, D.; PRAB, N.; GLOY, Y. S. Textile learning factory 4.0—preparing Germany's textile industry for the digital future. <b>Procedia Manufacturing</b> , v. 9, p. 214-221, 2017.
42	LEE, C. K. M.; ZHANG, S. Z.; NG, K. K. H. Development of an industrial Internet of things suite for smart factory towards re-industrialization. <b>Advances in Manufacturing</b> , v. 5, n. 4, p. 335-343, 2017a.
43	LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. <b>Manufacturing Letters</b> , v. 3, p. 18-23, 2015.

44	LEE, M. X.; LEE, Y. C.; CHOU, C. J. Essential implications of the digital transformation in industry 4.0. <b>Journal of Scientific &amp; Industrial Research</b> , v. 76, p. 465-467, 2017b.
45	LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E. D. F. R.; RAMOS, L. F. P. Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. <b>International Journal of Production Research</b> , v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.
46	MARJANI, M.; NASARUDDIN, F.; GANI, A.; KARIM, A.; HASHEM, I. A. T.; SIDDIQA, A.; YAQOOB, I. Big IoT data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges. <b>IEEE Access</b> , v. 5, p. 5247-5261, 2017.
47	MARTINEZ, F.; JIRSAK, P.; LORENC, M. Industry 4.0. the end lean management? <b>The 10<sup>th</sup> international Days of Statistics and Economics</b> , p. 8-10, 2016.
48	MICIETA, B.; HERCKO, J.; BOTKA, M.; ZRNIC, N. Concept of intelligent logistic for automotive industry. <b>Journal of Applied Engineering Science</b> , v. 14, n. 2, p. 233-238, 2016.
49	MORA, E.; GAIARDELLI, P.; RESTA, B.; POWELL, D. Exploiting lean benefits through smart manufacturing: a comprehensive perspective. <b>International Conference on Advances in Production Management Systems</b> , p. 127-134, 2017.
50	MOURTZIS, D.; VLACHOU, A.; ZOGOPOULOS, V. Cloud-based augmented reality remote maintenance through shop-floor monitoring: a product-service system approach. <b>Journal of Manufacturing Science and Engineering</b> , v. 139, n. 6, p. 061011, 2017a.
51	MOURTZIS, D.; ZOGOPOULOS, V.; VLACHOU, E. Augmented reality application to support remote maintenance as a service in the Robotics industry. <b>Procedia CIRP</b> , v. 63, p. 46-51, 2017b.
52	MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. Towards lean production in industry 4.0. <b>Proceedings of the 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management</b> , v. 182, p. 466-473, 2017.
53	NEUGEBAUER, R.; HIPPMANN, S.; LEIS, M.; LANDHERR, M. Industrie 4.0-From the perspective of applied research, <b>Proceedings of the 49<sup>th</sup> Conference on Manufacturing Systems</b> , v. 57, p. 2-7, 2016.
54	NOONEN, M.; JONES, S. Can lean innovation bring growth and profits back to semiconductors?. <b>Solid State Technology</b> , v. 57, n. 5, p. 19-24, 2014.
55	NUNES, M. L.; PEREIRA, A. C.; ALVES, A. C. Smart products development approaches for industry 4.0. <b>Procedia Manufacturing</b> , v. 13, p. 1215-1222, 2017.
56	PRINZ, C.; MORLOCK, F.; FREITH, S.; KREGGENFELD, N.; KREIMEIER, D.; KUHLENKÖTTER, B. Learning Factory modules for smart factories in Industrie 4.0. <b>Procedia CIRP</b> , v. 54, p. 113-118, 2016.
57	RADZIWON, A.; BILBERGA, A.; BOGERSA, M.; MADSEN, E.S. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. <b>International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation</b> , v. 69, p. 1184-1190, 2014.
58	RANZ, F.; SCHUHMACHER, J.; HUMMEL, V. Competence development for collaborative work systems in learning factories. In: <b>IIE Annual Conference. Proceedings Institute of Industrial and Systems Engineers</b> , 2015.
59	REN, L.; ZHANG, L.; TAO, F.; ZHAO, C.; CHAI, X.; ZHAO, X. Cloud manufacturing: from concept to practice. <b>Enterprise Information Systems</b> , v. 9, n. 2, p. 186-209, 2015.
60	RODSETH, H.; SCHJOLBERG, P.; MARHAUG, A. Deep digital maintenance. <b>Advances in Manufacturing</b> , v. 5, n. 4, p. 299-310, 2017.
61	RONG, W.; VANAN, G. T.; PHILLIPS, M. The internet of things (IoT) and transformation of the smart factory. In: <b>Electronics Symposium (IES) 2016 International</b> , p. 399-402, 2016.
62	RUBMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. <b>Boston Consulting Group</b> , v. 9, 2015.
63	SACKEY, S. M.; BESTER, A.; ADAMS, D. Industry 4.0 learning factory didactic design parameters for industrial engineering education in South Africa. <b>South African Journal of Industrial Engineering</b> , v. 28, n. 1, p. 114-124, 2017.
64	SALMI, A.; DAVID, P.; BLANCO, E.; SUMMERS, J. Deciding the level of automation during the design of assembly systems: Literature review of decision methods and a new approach proposal. <b>International Conference on Computers &amp; Industrial Engineering</b> , 2015.

65	SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. <b>Journal of Industrial Engineering and Management</b> , v. 9, n. 3, p. 811-833, 2016.
66	SANDERS, A.; SUBRAMANIAN, K. R.; REDLICH, T.; WULFSBERG, J. P. Industry 4.0 and lean management—synergy or contradiction?. <b>International Conference on Advances in Production Management Systems</b> , p. 341-349, 2017.
67	SANIUK, S.; SANIUK, A. Decision support system for rapid production order planning in production network. In: <b>International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance</b> , p. 217-226, 2017.
68	SCHUH, G.; POTENTE, T.; WESCH-POTENTE, C.; WEBER, A. R.; PROTE, J. P. Collaboration mechanisms to increase productivity in the context of industrie 4.0. <b>Procedia CIRP</b> , v. 19, p. 51-56, 2014.
69	SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. <b>Procedia CIRP</b> , v. 52, p. 161-166, 2016.
70	SHARIATZADEH, N.; LUNDHOLM, T.; LINDBERG, L.; SIVARD, G. Integration of digital factory with smart factory based on Internet of Things. <b>Proceedings of 26<sup>th</sup> Design Conference</b> , v. 50, p. 512-517, 2016.
71	SHIH, L. H.; LEE, Y. T.; HUARNG, F. Creating customer value for product service systems by incorporating internet of things technology. <b>Sustainability</b> , v. 8, n. 12, p. 1217, 2016.
72	SPATH, D.; GERLACH, S.; HAMMERLE, M.; SCHLUND, S.; STROLIN, T. Cyber-physical system for self-organised and flexible labour utilisation. <b>Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Production Research</b> , v. 50, n. 22, 2013.
73	STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. <b>Procedia Cirp</b> , v. 40, p. 536-541, 2016.
74	STOJKIC, Z.; VEZA, I.; BOSNJAK, I. Concept of information system implementation (crm and erp) within industry 4.0. In 26 <sup>th</sup> DAAAM <b>International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation</b> , p. 912-919, 2016.
75	STRUEKER, J.; WEPPNER, H. A Cloud-based Messaging Service for Cross-Enterprise Data Exchange with Smart Objects. <b>Proceedings in Association for Information Systems</b> , 2012.
76	STRANDHAGEN, J. W.; ALFNES, E.; STRANDHAGEN, J. O.; VALLANDINGHAM, L. R. The fit of industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study. <b>Advances in Manufacturing</b> , v.5, n. 4, p. 344-358, 2017.
77	TAMÁS, P.; ILLÉS, B. Process improvement trends for manufacturing systems in industry 4.0. <b>Academic Journal of Manufacturing Engineering</b> , v. 14, n. 4, 2016.
78	TAMÁS, P.; ILLÉS, B.; DOBOS, P. Waste reduction possibilities for manufacturing systems in the industry 4.0. In IOP Conference Series: <b>Materials Science and Engineering</b> , v. 161, n. 1, p. 012074, 2016.
79	TAMÁS, P. Decision support simulation method for process improvement of intermittent production systems. <b>Applied Sciences</b> , v.7, n. 9, p. 950, 2017.
80	TAO, F.; ZHANG, L.; VENKATESH, V. C.; LUO, Y.; CHENG, Y. Cloud manufacturing: a computing and service-oriented manufacturing model. <b>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture</b> , v. 225, n. 10, p. 1969-1976, 2001.
81	TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. <b>International Journal of Production Research</b> , v. 56, n. 8, p.2975-2987, 2017.
82	TRSTENJAK, M.; COSIC, P. Process planning in Industry 4.0 environment. <b>Procedia Manufacturing</b> , v. 11, p. 1744-1750, 2017.
83	VALMOHAMMADI, C. Examining the perception of Iranian organizations on internet of things solutions and applications. <b>Industrial and Commercial Training</b> , v. 48, n. 2, p. 104-108, 2016.
84	VILLALBA, D. J.; ORDIERES, M. J. B.; NUBER, G. The HOSHIN KANRI TREE. cross-plant lean shopfloor management. <b>Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Learning Factories</b> , v. 32, p. 150-155, 2015.
85	WAGNER, T.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. Industry 4.0 impacts on lean production systems. <b>Proceedings of the 50<sup>th</sup> Conference on Manufacturing Systems</b> , v. 63, p. 125-131, 2017.

86	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. <b>Computer Networks</b> , v. 101, p. 158-168, 2016.
87	WEYER, S.; SCHMITT, M.; OHMER, M.; GORECKY, D. Towards industry 4.0-standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. <b>IFAC-Papers online</b> , v. 48, n. 3, p. 579-584, 2015.
88	WIECH, M.; BOLLHOFF, J.; METTERNICH, J. Development of an optical object detection solution for defect prevention in a Learning Factory. <b>Procedia Manufacturing</b> , v. 9, p. 190-197, 2017.
89	XU, R.; YANG, L.; YANG, S. H. Architecture design of internet of things in logistics management for emergency response. In: <b>Green Computing and Communications (GreenCom), IEEE and Internet of Things (iThings/CPSCoM), IEEE International Conference on e IEEE Cyber, Physical and Social Computing</b> , p. 395-402, 2013.
90	XU, Y.; CHEN, M. Improving just-in-time manufacturing operations by using internet of things based solutions. <b>Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprise Technology</b> , v. 56, p. 326-331, 2016.
91	YOON, J. S.; SHIN, S. J.; SUH, S. H. A conceptual framework for the ubiquitous factory. <b>International Journal of Production Research</b> , v. 50, n. 8, p. 2174-2189, 2012.
92	ZHANG, Z.; LIU, G.; JIANG, Z.; CHEN, Y. A cloud-based framework for lean maintenance, repair, and overhaul of complex equipment. <b>Journal of Manufacturing Science and Engineering</b> , v. 137, n. 4, p. 040908, 2015.
93	ZÜEHLKE, D. Smart factory - towards a factory-of-things. <b>Annual Reviews in Control</b> , v. 34, n. 1, p. 129-138, 2010.

**APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO PARA AVALIAR O NÍVEL DE IMPORTÂNCIA  
DAS DIMENSÕES EM I4.0 E ME**

**Questionário Aplicado**

Este questionário tem por objetivo conhecer o nível de importância das principais dimensões da Indústria 4.0 e Manufatura enxuta na sua empresa.  
Muito obrigado por sua participação!

(1) Quanto ao seu perfil demográfico, indique:

Nº	Perfil Demográfico	
1	Idade:	
2	Formação:	
3	Cargo:	
4	Setor:	
5	Tempo na função atual:	
6	Tempo na empresa atual:	
7	Anos de experiência com implementação em Manufatura enxuta:	

(2) Quanto às dimensões da Indústria 4.0, indique o nível de importância das dimensões para a melhoria dos índices de desempenho operacional nas áreas produtivas:

\* Escala de nível de importância das dimensões da Indústria 4.0 (1 = NENHUMA IMPORTÂNCIA, 5 = MÁXIMA IMPORTÂNCIA)

Nº	Dimensões da Indústria 4.0	1	2	3	4	5
1	Visão de futuro					
2	Cultura					
3	Operações					
4	Tecnologia e análise de dados					

(3) Quanto às dimensões da Manufatura enxuta, indique o nível de importância das dimensões para a melhoria dos índices de desempenho operacional nas áreas produtivas:

\* Escala de nível de importância das dimensões da Manufatura enxuta (1 = NENHUMA IMPORTÂNCIA, 5 = MÁXIMA IMPORTÂNCIA)

Nº	Dimensões da Manufatura enxuta	1	2	3	4	5
1	Visão de futuro					
2	Cultura					
3	Operações					
4	Qualidade					
5	Foco no cliente					
6	Custos					
7	Fornecedores					
8	Inventário					



**APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO PARA AVALIAR O GRAU DE DESENVOLVIMENTO DOS CRITÉRIOS EM I4.0 E ME**

<b>Questionário Aplicado</b>							
<p>Este questionário tem por objetivo conhecer o grau de desenvolvimento dos principais critérios da Indústria 4.0 e Manufatura enxuta na sua empresa. Muito obrigado por sua participação!</p>							
<p>(1) Quanto ao seu perfil demográfico, indique:</p>							
Nº	Perfil Demográfico						
1	Idade:						
2	Formação:						
3	Cargo:						
4	Setor:						
5	Tempo na função atual:						
6	Tempo na empresa atual:						
7	Anos de experiência com implementação em Manufatura enxuta:						
<p>(2) Quanto aos critérios da Indústria 4.0, indique o grau de desenvolvimento dos critérios na área onde você atua:</p> <p>* Escala do grau de desenvolvimento dos critérios da Indústria 4.0 (1 = NADA DESENVOLVIDO, 5 = PLENAMENTE DESENVOLVIDO)</p>							
Dimensões da Indústria 4.0	Nº	Critérios da Indústria 4.0	1	2	3	4	5
Visão de Futuro	1	Plano para novos negócios					
	2	Entendimento do contexto da Indústria 4.0					
	3	Disponibilidade de recursos					
Cultura	4	Compartilhamento do conhecimento					
	5	Colaboração					
	6	Cultura flexível					
	7	Treinamento voltado à I4.0					
	8	Liderança I4.0					
	9	Suporte para tomada de decisão					
	10	Coordenação I4.0					
Operações	11	Descentralização					
	12	Virtualização					
	13	Capacidade de análise					
	14	Operações em tempo real					
Tecnologia e análise de dados	15	TIC e segurança de dados					
	16	Tecnologias 4.0					
	17	Máquinas avançadas					
	18	Flexibilidade					
	19	Inteligência artificial					
	20	Digitalização					

(3) Quanto aos critérios da Manufatura enxuta, indique o grau de desenvolvimento dos critérios na área onde você atua:

\* Escala do grau de desenvolvimento dos critérios da Manufatura enxuta (1 = NADA DESENVOLVIDO, 5 = PLENAMENTE DESENVOLVIDO)

Dimensões da Manufatura enxuta	Nº	Crítérios da Manufatura enxuta	1	2	3	4	5
Visão de Futuro	1	Planejamento estratégico					
	2	Plano de negócio					
Cultura	3	Política de reconhecimento dos funcionários					
	4	Trabalho em equipe					
	5	Desempenho da liderança					
	6	Programas de treinamento					
	7	Absenteísmo					
	8	Rotatividade					
Operações	9	Desempenho operacional					
	10	Padronização de processos					
	11	<i>Setups</i>					
	12	OEE					
	13	TPM					
	14	Manutenção preventiva					
	15	Segurança					
	16	Sistemas puxados					
Qualidade	17	Melhoria contínua					
	18	Desempenho da qualidade					
	19	Sucata e retrabalho					
	20	Custos da qualidade					
Foco no Cliente	21	Prevenção de falhas					
	22	Gestão de relacionamento com o cliente					
	23	Satisfação dos clientes					
	24	Atender requisitos dos clientes					
	25	Entregas no prazo					
Custos	26	Custo de produção					
	27	Custos gerais					
	28	Redução dos custos					
Fornecedores	29	Parceria com fornecedores					
	30	Seleção de fornecedores					
	31	Envolvimento de fornecedores					
Inventário	32	Giro do inventário					
	33	Controle do estoque					
	34	Nivelamento da produção					