



Análise Sistemática de Revisão da Literatura em Diferentes Ambientes de Produção

JOÃO CARLOS RIBEIRO MATOS

outubro de 2024

**Análise Sistemática de Revisão da Literatura em
Diferentes Ambientes de Produção**

João Carlos Ribeiro Matos 1181026

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Gestão Industrial**

**Orientador: André Borges Guimarães Serra e Santos
Co-orientador: Leonilde Valera**

Júri:

Presidente:

Hernâni Miguel Reis Lopes, Professor Coordenador, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

José Pedro Teixeira Domingues, Investigador Principal, Universidade do Minho

André Borges Guimarães Serra e Santos, Professor Adjunto Convidado, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Porto, setembro de 2024

Agradecimentos

A realização deste projeto incluiu ajudas e apoios importantes, sem os quais não seria possível a concretização do mesmo.

Agradeço especialmente, ao docente orientador do ISEP, Eng.º André Serra e Santos, pela sua orientação, disponibilidade e transmissão de conhecimentos essenciais utilizados para a realização deste projeto. À Eng.ª Leonilde Varela, pela sua contribuição e orientação para o trabalho realizado.

Aos professores do ISEP, agradeço pelas discussões enriquecedoras, críticas construtivas e apoio durante o período de pesquisa.

Um grande agradecimento aos meus colegas de curso, pela disponibilidade e companheirismo que demonstraram no decorrer destes últimos anos.

Gostaria ainda de agradecer aos amigos que, de diferentes maneiras, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Os seus incentivos, foram essenciais para que eu mantivesse a motivação necessária para concluir este trabalho.

Um enorme agradecimento aos meus pais e família pelo seu incentivo, amizade e especialmente pelo seu apoio incondicional, pois sem eles o trajeto académico traçado seria impossível.

Por último, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação. A cada um de vocês, o meu mais sincero agradecimento.

Resumo

O ambiente empresarial sofreu uma transformação considerável como resultado da quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0. Esta mudança é marcada por uma maior conectividade, digitalização e automatização dos processos de fabrico, e uma maior ênfase na tomada de decisões baseada em dados. Para serem competitivas e reagirem rapidamente às mudanças no mercado, as empresas devem modificar as suas estratégias e processos de gestão à luz deste novo paradigma. Neste contexto, esta dissertação explora o domínio dinâmico dos paradigmas de gestão. O objetivo é desenvolver um trabalho de investigação que integre os diferentes paradigmas de gestão aplicáveis na era da Indústria 4.0, focando-se nas abordagens de Gestão *Lean*, Gestão Ágil, Gestão Colaborativa e Gestão em Tempo Real, avaliando a sinergia, vantagens e benefícios, dificuldades e barreiras de implementação no contexto da Indústria 4.0. Foi realizada uma revisão bibliográfica através do método *snowballing*, no sentido de obter uma compreensão aprofundada dos temas referidos. Ainda na revisão bibliográfica é feita uma análise bibliométrica, que permite compreender o estado atual desta área de investigação. Posteriormente é feita uma exploração de interconexões para melhor compreensão do tema. Seguidamente, será feita uma Revisão Sistemática da Literatura estruturada em seis passos, que recorre a bases de dados como a Web of Science. Este processo sistemático permite consolidar o conhecimento e discutir as interconexões entre os paradigmas de gestão e a Indústria 4.0. Os resultados do estudo mostram que cada paradigma de gestão tem qualidades especiais que são vantajosas quando incorporadas no ambiente digital da Indústria 4.0. Por exemplo, a Gestão Ágil melhora a flexibilidade e a capacidade de adaptação a desenvolvimentos imprevistos, enquanto a Gestão *Lean* ajuda a reduzir o desperdício e a otimizar os procedimentos. A Gestão em Tempo Real utiliza dados em tempo real para permitir operações eficientes e reações rápidas às flutuações do mercado, enquanto a Gestão Colaborativa ajuda a coordenação e a comunicação entre muitos intervenientes na cadeia de valor. A utilização dessas estratégias no contexto da Indústria 4.0 potencializa a sinergia entre a tecnologia digital e os procedimentos de gestão, além de atender às novas demandas organizacionais e oferecer uma assistência abrangente, adaptável e eficaz. De acordo com a dissertação, a integração dessas abordagens pode auxiliar as empresas a superar obstáculos relacionados à tecnologia e à cultura, ao promover uma gestão mais inteligente, flexível e cooperativa, capaz de reagir rapidamente às mudanças no mercado e às expectativas dos clientes. O trabalho conclui com recomendações para investigação futura, destacando a necessidade de investigar mais detalhadamente a integração prática destas técnicas nas empresas e de identificar os obstáculos específicos que precisam de ser abordados em várias indústrias. Ao apresentar uma investigação exaustiva das sinergias entre os paradigmas de gestão e as tecnologias da Indústria 4.0, a dissertação faz avançar o tema da gestão industrial e estabelece as bases para um estudo mais aprofundado e aplicações úteis.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria 4.0, Gestão *Lean*, Gestão Ágil, Gestão Colaborativa, Gestão em Tempo Real, Integração

Abstract

The business environment has undergone a considerable transformation as a result of the fourth industrial revolution, or Industry 4.0. This change is marked by greater connectivity, digitization and automation of manufacturing processes, and a greater emphasis on data-based decision-making. In order to be competitive and react quickly to changes in the market, companies must modify their strategies and management processes in light of this new paradigm. In this context, this dissertation explores the dynamic domain of management paradigms. The aim is to develop a research project that integrates the different management paradigms applicable in the era of Industry 4.0, focusing on the approaches of Lean Management, Agile Management, Collaborative Management and Real-Time Management, assessing synergy, advantages and benefits, difficulties and barriers of implementation in the context of Industry 4.0. A literature review was carried out using the snowballing method in order to gain an in-depth understanding of the topics mentioned. The literature review also includes a bibliometric analysis, which allows to understand the current state of this area of research. This is later followed by an exploitation of interconnections for a better understanding of the subject. This is followed by a six-step Systematic Literature Review using databases such as Web of Science. This systematic process makes it possible to consolidate the findings and discuss the interconnections between management paradigms and Industry 4.0. The results of the study show that each management paradigm has special qualities that are advantageous when incorporated into the digital environment of Industry 4.0. For example, Agile Management improves flexibility and the ability to adapt to unforeseen developments, while Lean Management helps reduce waste and optimize procedures. Real-Time Management uses real-time data to enable efficient operations and quick reactions to market fluctuations, while Collaborative Management helps coordination and communication between many players in the value chain. The use of these strategies in the context of Industry 4.0 enhances the synergy between digital technology and management procedures, as well as meeting new organizational demands and offering comprehensive, adaptable and effective assistance. According to the dissertation, integrating these approaches can help companies overcome obstacles related to technology and culture by promoting more intelligent, flexible and cooperative management, capable of reacting quickly to changes in the market and customer expectations. The paper concludes with recommendations for future research, highlighting the need to further investigate the practical integration of these techniques in companies and to identify the specific obstacles that need to be addressed in various industries. By presenting a thorough investigation of the synergies between management paradigms and Industry 4.0 technologies, the dissertation advances the topic of industrial management and lays the foundations for further study and useful applications.

KEYWORDS: Industry 4.0, Lean Management, Agile Management, Collaborative Management, Real-Time Management, Integration

Índice

Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas.....	xiv
Acrónimos e Siglas	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura do Trabalho	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Paradigmas de Gestão.....	5
2.1.1. Gestão <i>Lean</i>	5
2.1.2. Gestão Ágil.....	10
2.1.3. Gestão Colaborativa.....	14
2.1.4. Gestão em Tempo Real.....	18
2.2. Indústria 4.0	20
2.2.1. Contextualização e Definição Histórica	21
2.2.2. Princípios e exigências da Indústria 4.0.....	23
2.2.3. Modelo da Indústria 4.0.....	25
2.2.4. Sistemas Ciberfísicos (Cyber-Physical Systems – CPS).....	26
2.2.5. Internet das Coisas (Internet of Things – IoT).....	27
2.2.6. Big Data.....	28
2.2.7. Computação em Nuvem (Cloud Computing - CC).....	29
2.2.8. Simulação.....	30
2.2.9. Realidade Aumentada (Augmented Reality)	31
2.2.10. Automação/Robôs autónomos.....	32
2.2.11. Inteligência Artificial (Artificial Intelligence).....	33
2.2.12. Cibersegurança (Cyberscurity).....	35
2.2.13. Integração Horizontal e Vertical de Sistemas.....	37
2.2.14. Fabrico Aditivo.....	38
2.3. Análise Bibliométrica.....	39
2.4. Casos de Estudo	42
2.4.1. Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing	42
2.4.2. The link between information and digital technologies of industry 4.0 and agile supply chain: Mapping current research and establishing new research avenues	43
2.4.3. Collaborative Networks as a Core Enabler of Industry 4.0.....	43

2.4.4. Intelligent Small Object Detection for Digital Twin in Smart Manufacturing With Industrial Cyber-Physical Systems.....	44
2.5. Caminhos Futuros	45
2.6. Análise Crítica da Revisão da Literatura	45
3. Exploração de Interconexões.....	47
3.1. Benefícios da Implementação de Diversos Conceitos.....	47
3.2. Dificuldades e Obstáculos relacionados com a Integração, no Âmbito da I4.0 dos Paradigmas de Gestão	52
4. Metodologia RSL	57
4.1. Organizar e elaborar a questão de pesquisa.....	58
4.2. Localização e pesquisa da literatura	59
4.2.1. Base de Dados.....	59
4.2.2. Palavras-Chave.....	59
4.2.3. Search Query.....	60
4.3. Recolha de dados e avaliação da qualidade.....	61
4.3.1. Critérios de Exclusão	61
4.3.2. Critérios de Inclusão	61
4.4. Seleção e avaliação das contribuições	62
4.5. Síntese e análise de dados	63
4.6. Apresentação e interpretação dos resultados	72
5. Resultados e Discussão	73
5.1. Análise de Tendências e Informação Geral.....	73
5.2. Avaliação dos Paradigmas de Gestão no Contexto da I4.0	78
5.3. Tecnologias I4.0.....	85
5.4. Sinergia entre os Paradigmas de Gestão e a I4.0	91
5.5. Gaps da Literatura	100
6. Conclusão	103
6.1. Conclusões finais	103
6.2. Limitações e trabalhos futuros.....	104
Referências.....	105

Lista de Figuras

Figura 1 - Principais pilares do conceito de colaboração, adaptado de [60]	16
Figura 2 - Perspetiva histórica das revoluções industriais [87].....	22
Figura 3 - Princípios da Indústria 4.0. adaptado de [91]	23
Figura 4 - Nove Pilares da Indústria 4.0 [101]	25
Figura 5 - Inteligência Artificial, <i>Machine Learning</i> e <i>Deep Learning</i> [161]	35
Figura 6 - Citações e publicações ao longo do tempo por ano	40
Figura 7 - Publicações em cada área de investigação	41
Figura 8 - Visualização em rede das palavras-chave mais usadas na literatura	42
Figura 9 - Fluxograma Metodologia RSL	58
Figura 10 - Gráfico Publicações por Ano	74
Figura 11 - Gráfico Publicações por Editor.....	75
Figura 12 - Gráfico dos Diferentes Blocos de Estudo	76
Figura 13 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, resultante da RSL	77
Figura 14 - Mapa dos países de origem das principais contribuições sobre paradigmas de gestão na I4.0	78
Figura 15 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, em relação a Gestão <i>Lean</i> e I4.0	95
Figura 16 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, em relação a Gestão Ágil e I4.0.....	96
Figura 17 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, em relação a Gestão Colaborativa e I4.0	98
Figura 18 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, em relação a Gestão em Tempo Real e I4.0	99

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Ferramentas e metodologias <i>Lean</i> [20]	8
Tabela 2 - Princípios e Exigências da Indústria 4.0.....	24
Tabela 3 - Palavras-Chave da Análise Bibliométrica	40
Tabela 4 - Outros Casos de Estudo.....	44
Tabela 5 - Benefícios dos Diferentes Paradigmas de Gestão.....	50
Tabela 6 - Dificuldades e Obstáculos relacionados com a Integração, no Âmbito da I4.0 dos Paradigmas de Gestão	55
Tabela 7 - Grupos das Palavras-Chave	60
Tabela 8 - Resultados da RSL e principais contribuições	63

Acrónimos e Siglas

Lista de Acrónimos e Siglas

CC	<i>Cloud Computing</i>
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
CPPS	<i>Cyber-Physical Production Systems</i>
DSDM	<i>Dynamic Systems Development Method</i>
FDD	<i>Feature Driven Development</i>
HRC	<i>Human-Robot Collaboration</i>
LD	<i>Lean Development</i>
I4.0	Indústria 4.0
IA	Inteligência Artificial
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoS	<i>Internet of Sevices</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LD	<i>Lean Development</i>
M2M	Máquina-a-Máquina
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
PME	Pequenas e Médias Empresas
TPS	<i>Toyota Production System</i>
XP	<i>eXtreme Programming</i>

1. Introdução

O tema da dissertação é introduzido neste primeiro capítulo, que define também os objetivos e as questões de investigação. Apresenta a metodologia utilizada e um resumo da organização do trabalho.

1.1. Contextualização

A rápida evolução da economia e a crescente complexidade do panorama empresarial refletem-se e são impulsionadas pelo rápido aparecimento e superação de novos conceitos e princípios de gestão. Os paradigmas de gestão são guias e pilares de orientação, sendo descritos como quadros de referência para conhecer o mundo e servir de base para orientar as atividades, aplicáveis a diferentes ambientes de produção [1].

No século XXI, o mundo assiste à quarta revolução industrial e à transformação digital do mundo empresarial, geralmente designada por Indústria 4.0 (I4.0). A revolução digital está a transformar significativamente a forma como as pessoas vivem e trabalham, e a sociedade em geral encontra-se otimista quanto às potenciais oportunidades que a I4.0 pode oferecer [2].

Em vários sectores, estão a ocorrer mudanças profundas, como evidenciado pelo aparecimento de novos modelos de gestão, a perturbação das empresas existentes e a transformação das redes de produção, consumo, transporte e distribuição. A nível social, está em curso uma mudança de paradigma na forma como os indivíduos trabalham e interagem [3].

A Gestão *Lean* um dos paradigmas mais difundidos e aplicados define que, qualquer consumo de recursos que não traga valor para o utilizador final é considerado um desperdício. Existe uma distinção clara entre valor e desperdício [4].

Posteriormente, surgiu uma nova abordagem denominada de Gestão Ágil que defende a capacidade de prosperar e de se destacar num ambiente competitivo com mudanças imprevisíveis e frequentes através agilidade e flexibilidade [5].

Ademais, a Gestão Colaborativa defende a utilização de abordagens de partilha de recursos e informação entre duas ou mais entidades cooperantes para resolver um problema em comum, através da conciliação das prioridades individuais e coletivas [6].

Para facilitar a rápida adaptabilidade a mudanças e atividades dinâmicas externas (mercado) e internas (organização) a Gestão em Tempo Real é o paradigma mais adequado. Dito de outra forma, o seu objetivo é resolver problemas dinâmicos que são simultaneamente pró-ativos e reativos [7].

A tecnologia é essencial para a I4.0 e para os paradigmas de gestão anteriormente discutidos. Estas são necessárias para a integração dos paradigmas, o que afeta a facilidade e a implementação da sua aplicação. A eficácia e a eficiência destas tecnologias alimentam a sinergia entre a I4.0 e os paradigmas de gestão.

A convergência destes paradigmas de gestão - *Lean, Agile, Collaborative, Real-Time* - e as forças transformadoras da I4.0 serão o ponto focal da dissertação em questão, procurando explorar as intersecções e sinergias dos temas referidos. As organizações reconhecem a necessidade de integrar estas abordagens de forma sinérgica para usufruir dos benefícios coletivos e enfrentar os desafios multifacetados do panorama empresarial atual.

1.2. Objetivo

O principal propósito do trabalho realizado consiste na análise comparativa de distintas abordagens de gestão da produção, no contexto da I4.0. A análise comparativa de diversas abordagens de gestão da produção será conduzida por meio de um estudo sistemático de revisão da literatura, abordando as práticas de gestão industrial em diversos ambientes de produção. Além disso, técnicas e tecnologias de suporte adequadas aos diferentes ambientes e paradigmas de gestão irão ser analisadas. Assim irá ser feita uma avaliação da sinergia entre os paradigmas de gestão e a relação de integração que estes possuem tendo em conta a I4.0.

O objetivo é compreender e sintetizar os conhecimentos existentes para obter uma compreensão pormenorizada das ligações entre os elementos que compõem este tema. Os objetivos específicos consistem em:

- Identificar possíveis vantagens e benefícios associados à implementação dos diferentes conceitos abordados;
- Determinar e avaliar as dificuldades e os obstáculos relacionados com a integração, no âmbito da I4.0 dos paradigmas de gestão referidos e como as tecnologias da era da digitalização podem influenciar a integração;
- Auxiliar a uma análise aprofundada de vários paradigmas de gestão com o objetivo de melhorar os processos de tomada de decisão na gestão integrada;
- Contribuir para as futuras direções da investigação através, da avaliação da sinergia entre os paradigmas de gestão referidos e a I4.0.

Assim, estes pontos foram concebidos para orientar o estudo sistemático da literatura e contribuir para uma compreensão completa da integração e sinergia das técnicas de gestão no contexto da I4.0.

1.3. Metodologia

Este capítulo serve de ponto de partida para uma análise pormenorizada da abordagem adotada na realização de uma revisão sistemática da literatura (RSL) no contexto desta dissertação. De acordo com Saunders [8, 9], a filosofia de investigação da dissertação apresenta

carácter interpretativo e decorre num espaço temporal transversal. Abordagem tomada é de natureza indutiva, pois é feita uma recolha de informação e desenvolvimento de uma teoria como resultado da análise dessa informação. É utilizado um mono método quantitativo centrado na investigação documental.

Para revisão bibliográfica, recorreu-se ao método de bola de neve (*snowballing*). Para cada tópico, foram selecionados artigos com informações relevantes. Posteriormente, ao examinar as listas de referências desses artigos selecionados, foi possível constatar outras fontes pertinentes, estabelecendo uma cadeia sequencial de pesquisa. Este método, comumente utilizado em engenharia, é recomendado para a fase preliminar de uma investigação, uma vez que permite uma compreensão mais abrangente dos conceitos que estão a ser abordados [10].

A RSL vai de correr dos seguintes seis passos para avaliar as relações principais entra a I4.0 e os paradigmas de gestão investigados [11]:

1. Organizar e elaborar a questão de pesquisa;
2. Localização e pesquisa da literatura;
3. Recolha de dados e avaliação da qualidade;
4. Seleção e avaliação das contribuições;
5. Síntese e análise de dados;
6. Apresentação e interpretação dos resultados.

1.4. Estrutura do Trabalho

O trabalho desenvolvido encontra-se dividido em vários capítulos nomeadamente, Introdução; Revisão Bibliográfica; Exploração de Interconexões; Metodologia; Resultados e Discussão e Conclusão

Na introdução é descrita a contextualização e enquadramento do tema da dissertação, é feita uma exposição detalhada e enumeração dos objetivos da investigação, descreve-se a metodologia utilizada para alcançar os resultados e segue-se uma curta descrição da estrutura e apresentação dos vários capítulos do trabalho.

Seguidamente, no capítulo da Revisão Bibliográfica é efetuada uma análise da literatura, onde se aborda temas como *Gestão Lean*, *Gestão Ágil*, *Gestão Colaborativa*, *Gestão em Tempo Real*, I4.0 e a suas ferramentas, partindo do geral para o específico. Ainda neste capítulo, é consumada uma análise bibliométrica de acordo com o contexto do trabalho, uma análise a casos de estudo e por fim são sugeridos caminhos futuros e uma análise crítica sobre a literatura deste tema.

Posteriormente, no capítulo Exploração de Interconexões onde é realizada uma síntese dos conhecimentos existentes para uma compreensão pormenorizada dos componentes anteriormente abordados.

No capítulo da Metodologia, é explicada passo a passo a Revisão Sistemática da Literatura , bem como os critérios utilizados e o porque da seleção dos mesmos para a validação da pesquisa realizada.

O capítulo Resultados e Discussão, trata dos resultados resultantes da RSL. Classifica os dados de acordo com as categorias ou tópicos associados às questões do estudo. É refletido sobre as implicações que os resultados têm para o assunto em geral e como se relacionam com as questões de investigação.

Por fim, o último capítulo denominado de Conclusão apresenta conclusões finais do trabalho desenvolvido e abrange-se as limitações e trabalhos futuros desta dissertação.

2. Revisão Bibliográfica

Esta secção introduz definições e conceitos essenciais, fornecendo uma base teórica para a investigação da dissertação. Está dividida em Paradigmas de Gestão, I4.0, Análise Bibliométrica, Caminhos Futuros e Análise Crítica da Revisão Bibliográfica.

2.1. Paradigmas de Gestão

A literatura sobre gestão e gestão da produção apresenta uma série de paradigmas, num esforço para apoiar as empresas na difícil tarefa de se manterem competitivas no mundo moderno e globalizado [12]. A execução, o acompanhamento, o planeamento estratégico e a implementação de medidas, encontram-se todos incluídos na execução das operações e são designados por "gestão" [13]. A aprendizagem torna-se essencial, por permitir aos gestores antecipar as mudanças no ambiente empresarial e adaptar-se rapidamente ao inesperado. Atualmente, as competências fundamentais para uma empresa de sucesso são a criatividade, o intelecto e as ideias numa economia baseada no conhecimento [1].

Os paradigmas de gestão estão amplamente disponíveis; são definidos como estruturas para compreender o ambiente e orientar o comportamento. A palavra "paradigma", que provem da palavra grega *paradeigma*, refere-se normalmente a uma estrutura ou modelo. A mudança de paradigma é utilizada no discurso da gestão contemporânea para descrever as transições organizacionais provocadas por mudanças dinâmicas no ambiente empresarial [1].

Os elementos fundamentais conhecidos como capacidades de gestão são a base de estratégias de gestão eficazes. As competências de gestão, referem-se à capacidade de uma organização competir em dimensões-chave como a liderança, a eficiência, a flexibilidade e a atualidade. A ênfase dada a estas características semelhantes é especialmente realçada pela expressão "prioridades competitivas" [14].

Assim, no decorrer deste capítulo irão ser abordados diferentes paradigmas de gestão.

2.1.1. Gestão *Lean*

Nas últimas décadas, uma das estratégias empresariais ou paradigmas de produção mais adotados tem sido o pensamento ou gestão *Lean*. O *Lean Thinking* refere-se aos instrumentos que são utilizados para pôr em prática as ideias da filosofia *Lean* e dentro de uma organização, esta é utilizada para distinguir o valor e o desperdício (*Muda*) [15].

Lean Manufacturing ou *Lean Management* também designado por *Toyota Production System* (TPS), foi criado por Taichii Ohno na *Toyota Motor Corporation* na década de 1970. É uma alternativa básica à abordagem tradicional de produção em massa, que visa produzir um único produto em grandes quantidades, a fim de minimizar o custo unitário de produção e, assim, gerar lucro [16]. A metodologia *Lean* visa a qualidade e a adaptabilidade dos processos, com uma forte ênfase na redução dos desperdícios e na procura constante de zero perdas. Estas metas foram estabelecidas com o objetivo de expandir a capacidade de produção para competir num ambiente mundial. O princípio fundamental é gerar apenas o que é necessário e no momento adequado [16].

Refere-se a uma estratégia comercial que tenta evitar perdas e tem um foco significativo no cliente e no que ele considera como valor no produto ou serviço adquirido, ou seja, a qualidade do produto ou serviço prestado é baseada nas expectativas do cliente [17].

Sendo assim, esta metodologia procura a melhoria contínua dos processos de uma organização, elimina desperdícios e centra-se no valor. O desperdício é definido como "qualquer atividade humana que consome recursos, mas não cria valor". Do ponto de vista empresarial, o valor é definido como a capacidade fornecida a um cliente no momento certo e ao preço certo, determinado por cada cliente [15, 18]. Em suma, o *Lean Management* foca-se na identificação e eliminação de desperdícios e na melhoria contínua dos processos numa organização.

De acordo com Touriki [19], o *Lean Management* também é considerado uma abordagem sociotécnica holística que minimiza as variações de produção para reduzir o desperdício.

O *Lean Management* é suportado por cinco princípios base que dão ênfase à melhoria contínua [15, 18, 20, 21]:

- Especificar o valor por produtos específicos, como a capacidade oferecida ao consumidor final no momento certo e ao preço certo;
- Identificar o fluxo de valor de cada produto sendo que o mesmo pode estar relacionado com o movimento de recursos, nomeadamente pessoas e materiais, fluxo de informação ou dinheiro;
- Garantir que o fluxo de valor seja ininterrupto. A finalidade é ter um fluxo contínuo ao longo da cadeia de valor, ou seja, sem paragens que impliquem a interrupção ou redução da atividade;
- Permitir que o cliente "puxe" o valor do fabricante. Puxar significa que a produção começa apenas para satisfazer as necessidades do cliente;
- A procura pela excelência, exige um esforço incessante para satisfazer as necessidades dos clientes e eliminar o *Muda*.

Além disso, os princípios *Lean* oferecem várias vias para promover a sustentabilidade. O desempenho *Lean* e a sustentabilidade estão intimamente ligados através de três dimensões chave: ambiental, social e económica. Ambos perseguem objetivos análogos e exibem um potencial sinérgico. No entanto, vale a pena notar que os princípios *Lean* podem não estar preparados para lidar eficazmente com a elevada volatilidade do mercado [22].

Muda é a palavra japonesa correspondente a desperdício e desempenha um papel fundamental na Gestão *Lean*. Primeiramente, foram identificados sete tipos de desperdícios por Taiichi Ohno [15, 16, 23]:

- Transporte, envolve perda de tempo e dinheiro com os deslocamentos de recursos de um posto de trabalho para outro;
- Inventário, inventário excessivo não utilizado;
- Movimento, qualquer movimento de pessoas ou equipamentos que não acrescenta valor ao produto ou serviço é considerado um desperdício;
- Espera, o tempo é desperdiçado quando um processo espera para ser iniciado enquanto outro termina, tornando o funcionamento ineficaz e interferindo no fluxo regular e contínuo da operação;
- Sobreprodução, um excesso de produção em relação à procura leva a desperdício de recursos, tempo e espaço e conseqüentemente dinheiro;
- Excesso de processamento, são atividades que não agregam valor ao produto, ou seja, que não vão de encontro com os requisitos do cliente;
- Defeitos, existe desperdício de recursos pois foram utilizados para a produção de itens defeituosos, afetando a qualidade e conseqüentemente a satisfação do cliente.

Atualmente, são considerados 8 tipos de desperdícios, sendo o oitavo o talento dos colaboradores. Ocupar trabalhadores com tarefas que limitam suas capacidades ou quando o trabalho realizado não é valorizado pode levar a um sentimento de irrealização profissional [4, 15].

De acordo com a investigação, a atenção não deve centrar-se apenas nos resíduos, mas também nos outros dois fatores Muri e Mura. Muri é uma palavra japonesa que significa "esforço excessivo". Defende a existência de condições de trabalho seguras que reduzam as lesões e o esforço dos trabalhadores. Mura, que se refere a disparidades nos processos e defende a redução da variedade. Para diminuir o Mura, os procedimentos devem ser normalizados [15, 21, 24].

A implementação do *Lean Management* elimina as atividades sem valor acrescentado e dispendiosas, melhorando o desempenho da qualidade, diminuindo as avarias dos equipamentos e processos, reduz os níveis de stock, requer menos espaço, aumenta a eficiência e aumenta a satisfação do cliente, o que leva a maiores lucros, elevação da moral e participação dos colaboradores [4].

Para melhorar o grau de implementação da Gestão *Lean*, é necessário ter em atenção mais do que apenas as questões intra-organizacionais. A necessidade crescente de uma cooperação mais estreita com os principais fornecedores e clientes é um dos principais desafios que as empresas que estão a iniciar a implementação *Lean* enfrentam. Por conseguinte, é crucial efetuar uma análise da Gestão *Lean*, tanto do ponto de vista organizacional como da cadeia de abastecimento [25].

De maneira a avaliar as mudanças necessárias para a implementação do *Lean Management*, Karlsson and Åhlström (1996) apresentaram um modelo baseado nos princípios *Lean*. Identificaram determinantes e traduziram-nos numa forma quantificável que podem servir como indicadores de esforço pretendido para atingir um “*estado lean*” [20].

De uma forma mais prática, o *Lean Management* pode ser visto como um conceito multifacetado que engloba um conjunto abrangente de práticas de gestão integradas [26]. Permite minimizar, de forma colaborativa, o desperdício em toda a organização, melhorar a utilização de recursos essenciais e cultivar um ambiente corporativo comprometido com o reconhecimento e a execução sistemáticos de estratégias *Lean* que promovam a satisfação do cliente [26, 27]. Sendo assim esta necessita da aplicação de diversas ferramentas e filosofias. A Tabela 1 apresenta um resumo sobre as ferramentas e filosofias mais comuns [20].

Tabela 1 - Ferramentas e metodologias *Lean* [20]

Ferramentas e Filosofias	Descrição
FMEA – Análise de Modo e Efeito de Falha	Trata-se de um procedimento passo a passo para detetar e avaliar uma possível falha de um produto ou processo e suas repercussões, identificando medidas que possam eliminar ou diminuir a probabilidade da falha potencial e documentar o processo.
Cinco S's	Os cinco S's são nomeadamente Triagem, Organização, Limpeza, Normalização e Disciplina. Cria assim um ambiente no local de trabalho propício à gestão visual, à produção otimizada e aos métodos de trabalho normalizados.
Jidoka	Jidoka refere-se à qualidade na origem ou qualidade inerente. Proporciona aos trabalhadores a liberdade de pensarem por si próprios e dá-lhes o direito de pararem a linha em que estão a laborar.
TPM – Manutenção Produtiva Total	Garante que cada máquina num processo de fabrico pode sempre desempenhar as funções necessárias para evitar que a produção seja interrompida.
VSM – Mapeamento do Fluxo de Valor	O objetivo do VSM é fornecer uma representação visual de cada etapa dos fluxos de materiais e de informação, seguindo em primeiro lugar o percurso de fabrico de um produto do início ao fim. Em segundo lugar, é criado um mapa do cenário

	futuro ideal para o fluxo de valor, a fim de reduzir o desperdício e alcançar o " <i>lean production</i> ".
JIT – Just-In-Time	Com o objetivo de reduzir os custos e as existências, a gestão da produção Just-In-Time exige que tudo seja fabricado, entregue ou adquirido no momento adequado.
SMED – Troca Rápida de Ferramentas	Shigeo Shingo inventou um conjunto de métodos conhecidos como SMED que permitem que as máquinas de produção sejam substituídas em menos de 10 minutos. O objetivo ideal a longo prazo é a inexistência de <i>setups</i> , em que as transições ocorrem instantaneamente e não têm impacto no fluxo ininterrupto.
Kanban	A abordagem "pull" do KANBAN, alerta a operação anterior quando é necessário mais material ou produto, fornecendo material ou produto a uma operação subsequente.
Gestão Visual	Operadores podem avaliar com rapidez e precisão o estado da produção utilizando a gestão visual, demonstrando um sentido de responsabilidade no espaço de trabalho.
Trabalho Standard	Cada tarefa envolvida no Trabalho Standard é especificamente descrita, e todas as tarefas são organizadas tendo em conta a deslocação dos colaboradores, para que não haja desperdício no processo, padronizando o trabalho. Os três componentes do Trabalho Standard são o <i>takt time</i> , sequenciamento do trabalho e " <i>standard in process</i> " stock.
Heijunka	Heijunka significa nivelamento e permite a redução da irregularidade na produção minimizando a probabilidade de sobrecarga.

Atualmente, encontramos-nos numa era em que a digitalização ocupa o lugar central. Isto deu origem a uma nova versão de metodologias *Lean*, referidas como *Lean 4.0*, Automação *Lean*, *Lean Inteligente*, ou mesmo *Lean* no contexto da I4.0 [28]. O *Lean Management* pode ser visto como um complemento valioso da perspetiva tecnológica. Já existem exemplos de incorporação dos princípios da I4.0 na filosofia *Lean* que podem ser consolidados sob o conceito

de *Lean Automation*. Este está orientado para a obtenção de uma maior adaptabilidade e para a racionalização do fluxo de informação, de modo a responder eficazmente às futuras exigências do mercado [29]. A aplicação dos princípios da I4.0 aos processos *Lean* é evidente e essencial e a adoção da I4.0 pode ajudar a ultrapassar os obstáculos existentes à implementação de práticas *Lean* [30].

Como resultado desta evolução, foram propostas três teorias. De acordo com a primeira teoria, o *Lean* é um pré-requisito para a I4.0, uma vez que simplifica a automatização e a digitalização dos processos industriais. A segunda hipótese, por outro lado, adota uma abordagem contrária, salientando os constrangimentos da implementação *Lean* em termos de complexidade e flexibilidade dos processos e aspetos que a I4.0 pode resolver, por exemplo, através da recolha de dados em tempo real. A terceira hipótese, que integra as duas anteriores, afirma que o *Lean* é a chave do sucesso da produção e que a I4.0 otimiza a sua implementação, criando uma complementaridade e um apoio mútuo entre estes dois paradigmas [28]. A integração da tecnologia de automação da I4.0 com o *Lean Management* possibilita a criação de novas soluções.

2.1.2. Gestão Ágil

No contexto dos modelos de produção e gestão, "Agilidade" refere-se à capacidade de flexibilidade, que permite às empresas prosperar num mercado competitivo caracterizado por mudanças imprevisíveis e possibilita reações rápidas a variações impulsionadas pelas necessidades dos consumidores relativamente a produtos e serviços [31].

As abordagens e conceitos ágeis surgiram pela primeira vez na década de 1990, em resposta aos constrangimentos e limites dos processos tradicionais de desenvolvimento de software. Esta metodologia é definida como a capacidade de evoluir e prosperar num ambiente competitivo marcado por transformações contínuas e inesperadas, permitindo respostas rápidas a mercados em rápido desenvolvimento que promovem a valorização dos produtos orientados para o cliente [5]. A ênfase é colocada na promoção da inovação, flexibilidade e rapidez, com o objetivo subsequente de reduzir os custos de produção [32]. Centra-se na criação de um sistema de produção que pode mudar rapidamente entre modelos ou linhas de produção em resposta ao que o cliente pretende em termos de quantidade e tipo de produto [33]. Esta metodologia, dominou principalmente o sector de desenvolvimento de softwares e, graças às suas conquistas significativas, tem vindo a entrar gradualmente no domínio da produção de produtos tangíveis [34]. No entanto é necessário ter em conta os desafios colocados pela natureza física destes produtos, por oposição aos produtos puramente baseados em software [35].

Agilidade também pode ser definida como processos de aprendizagem que englobam tanto a exploração como o aproveitamento. A capacidade de uma equipa Ágil se adaptar rápida e eficazmente depende da resposta às mudanças e alterações dos procedimentos de desenvolvimento conforme necessário. Essencialmente, implica que a equipa possa alterar as suas táticas, objetivos e resultados em resposta à evolução das exigências dos utilizadores e das

condições do projeto, assegurando que o produto permanece relevante e valioso durante todo o ciclo de desenvolvimento [36].

Conboy, fornece uma descrição completa da *Agile Management*, que é investigada através da dissecação dos seus componentes e da utilização de tópicos adjacentes. O mesmo distingue entre agilidade, flexibilidade e *leaness*. A agilidade, neste sentido, vai além da flexibilidade e do *leaness*. A flexibilidade é a capacidade de acomodar e adaptar-se, de forma ativa ou reativa, às mudanças no sistema e às suas interações com o ambiente. A otimização está relacionada com o aumento do valor para o consumidor através de uma maior eficiência, qualidade e simplicidade [37].

De acordo com Lindsjørn (2016) [38], a Gestão Ágil é marcada por iniciativas de colaboração, que requerem uma ampla variedade de competências, tomadas de decisão inclusivas e a participação de pequenas equipas de projeto. A gestão tradicional, por outro lado, valoriza as contribuições individuais, as competências especializadas, tomadas de decisão de “*top-down*” e o recurso a equipas maiores de projeto. A Agilidade incentiva a mudança e modifica o plano do projeto conforme necessário durante o processo, em contraste com as técnicas tradicionais que necessitam de um planeamento prévio intensivo [34].

Os métodos ágeis também são diferentes das técnicas tradicionais de gestão de projetos porque dão ênfase à conceção contínua, ao âmbito flexível, ao adiamento da finalização das características da conceção tanto quanto possível, à aceitação da ambiguidade, ao incentivo ao envolvimento ativo do cliente e à existência de uma estrutura de equipa de projeto diferente. Além disso, o que distingue o método Ágil das abordagens tradicionais, que colocam mais ênfase na finalização antecipada do design e das especificações, é o facto deste ser incremental e iterativo [39].

O sector de desenvolvimento de softwares começou por dar origem ao desenvolvimento Ágil. Um grupo programadores criou o "Manifesto Ágil" em 2001 como a base da Gestão Ágil. Tomaram esta medida porque acreditavam que as normas de processo vigentes eram demasiado rígidas, burocráticas e restritivas da criatividade. O Manifesto oferece um roteiro para lidar com situações de desenvolvimento imprevisíveis e em constante mudança. Este pode ser adaptado para projetos de qualquer área, com foco em qualidade e satisfação do cliente e baseia-se em quatro valores centrais e doze princípios orientadores [40]. Os quatro valores são os seguintes [41, 42]:

- Indivíduos e interações acima de processos e ferramentas - É essencial atribuir valor àqueles que estão a gerar as necessidades que, por sua vez, impulsionam a produção de produtos. Incentiva a comunicação no ambiente operacional;
- Produto em funcionamento mais importante que documentação abrangente - Ênfase deve ser colocado no produto em vez da documentação extensa. O Manifesto valoriza a documentação, porém o seu foco é no produto;
- Colaboração com o cliente acima das negociações de contrato - As necessidades e expectativas do cliente são mais importantes que um contrato transaccional;

- Responder a mudanças em vez de seguir um plano - Centra-se na importância dos resultados mensuráveis e dá maior prioridade à flexibilidade e à capacidade de adaptação à mudança do que ao cumprimento rigoroso de um plano definido. O principal objetivo é satisfazer a procura do cliente e garantir que as necessidades do mesmo são supridas.

O Manifesto Ágil enumera doze princípios orientadores para abordagens baseadas na Gestão Ágil, para além dos quatro ideais referidos [41, 43]:

1. A maior prioridade é satisfazer o cliente através da entrega antecipada e contínua do produto - A entrega rápida e contínua do produto promove a confiança e a flexibilidade na relação entre o cliente e a equipa de trabalho. Esta colaboração permite-lhes dar prioridade aos requisitos existentes e propor novos requisitos;
2. Aceitar a mudança de requisitos, mesmo durante as últimas fases de desenvolvimento. As metodologias ágeis aproveitam a mudança como um meio de proporcionar uma vantagem competitiva;
3. Fornecer regularmente produtos funcionais em prazos relativamente curtos, preferindo idealmente intervalos mais curtos, entre algumas semanas e alguns meses;
4. Os colaboradores da área empresarial e os desenvolvedores do projeto devem coadjuvar diariamente durante todo o processo - Esta integração foca-se em dar feedback e procura responder às questões da equipa de desenvolvimento;
5. Estruturar os projetos em torno de profissionais motivados. Proporcionar um ambiente e apoio necessário, e ter confiança na capacidade dos profissionais para realizar a tarefa - Os elementos da equipa de desenvolvimento são o fator mais importante para alcançar o sucesso;
6. As interações presenciais são a forma mais eficiente e eficaz de partilhar informações com e dentro de uma equipa de trabalho - Dá prioridade à comunicação humana direta dentro das equipas ágeis em detrimento da utilização de requisitos ou planos escritos;
7. O principal indicador de progresso é a funcionalidade do produto;
8. A abordagem Ágil promove o desenvolvimento sustentável, com patrocinadores, programadores e utilizadores capazes de manter um ritmo de trabalho contínuo indefinidamente;
9. A manutenção de um foco contínuo na excelência técnica e em princípios de design bem definidos aumenta a agilidade - Entregar um produto de máxima qualidade é essencial para ser ágil, mesmo que seja necessário reformular o mesmo em resposta a alterações das necessidades dos clientes;
10. "Simplicidade - a arte de maximizar a quantidade de trabalho não efetuado" - implica otimizar, minimizando o trabalho desnecessário. O objetivo é construir

um produto que seja ao mesmo tempo simples e suficientemente versátil para aceitar mudanças rápidas, satisfazendo simultaneamente as necessidades do cliente;

11. As arquiteturas, requisitos e designs mais eficazes resultam de equipas que se auto-organizam - Com base nos conhecimentos adquiridos ao longo do processo de desenvolvimento, a equipa decide qual a melhor abordagem para gerir as responsabilidades, com o objetivo de obter a estrutura mais eficiente;
12. Em intervalos regulares, a equipa faz uma introspeção para melhorar a sua eficácia, introduzindo as melhorias e os ajustamentos necessários nas suas ações.

Assim, estes princípios incentivam a adaptabilidade, o trabalho em equipa e uma abordagem centrada no cliente, o que promove uma estratégia de gestão mais reativa e eficiente. O Manifesto Ágil teve uma enorme influência na indústria, resultando na adoção generalizada de metodologias ágeis e numa mudança de cultura para a agilidade em muitas organizações [42].

As metodologias ágeis representam um novo conjunto de abordagens que pretendem resolver os constrangimentos associados aos métodos tradicionais [35]. *Scrum*, *Kanban*, *eXtreme Programming* (XP), *Crystal*, *Dynamic Systems Development Method* (DSDM), *Feature Driven Development* (FDD) e *Lean Development* (LD) são algumas das abordagens baseadas em *Agile* que se desenvolveram. O *Scrum* é provavelmente a mais comum e difundida das referidas [44].

O *Scrum* é uma estratégia ágil e racionalizada para supervisionar e gerir o desenvolvimento de software e produtos utilizando técnicas iterativas e incrementais. Estabelece vários princípios fundamentais, tais como uma estrutura organizacional razoavelmente flexível, um feedback rápido e interativo, uma gestão plana orientada para os objetivos e a participação ativa dos membros [45]. Foi criado para acelerar o desenvolvimento, alinhar os valores dos colaboradores e das organizações, fomentar uma cultura centrada no desempenho, facilitar a criação de valor para os acionistas e promover uma comunicação eficaz do desempenho a todos os níveis [46].

Os projetos são estruturados em iterações/ciclos de inspeção designados por *sprints*, normalmente com uma duração de cerca de duas a quatro semanas, durante as quais devem ser realizadas atividades predefinidas que guiam o desenvolvimento do projeto. A lista de atividades predefinidas é denominada por *backlog* [47]. A colaboração entre a *Scrum Team*, o *Scrum Master* e o *Product Owner* é necessária para um desempenho bem conseguido do *Scrum* ao longo de várias iterações, à medida que o software/produto se desenvolve [46].

Na *Scrum Team*, não existem posições fixas e os programadores trabalham em colaboração para concluir as atividades do *sprint*. A sua capacidade de cooperar e dar prioridade aos objetivos do projeto do grupo em detrimento da realização individual é fundamental para o desempenho do *Scrum*. O *Product Owner* representa os consumidores e as partes interessadas, pelo que é essencial para a criação de requisitos. O *Scrum Master* orienta a equipa, verifica a produtividade, controla os riscos e protege a mesma de influências externas. É também responsável pelo bem-estar dos colaboradores [47].

No final de cada *sprint*, é efetuada uma revisão, em que o *Product Owner* recebe uma demonstração do incremento do produto que pode ser expedido [46].

A Gestão Ágil pode ser uma ferramenta fundamental para as empresas progredirem e prosperarem na era da I4.0. A integração de tecnologia no prisma industrial exige adaptabilidade e reatividade. O *Agile* pode desempenhar um papel crucial na adoção de tecnologias da I4.0 por parte de uma organização, permitindo às empresas gerir eficazmente as transformações decorrentes da adoção destas tecnologias. Além disso, a adoção de tecnologias da I4.0 pode aumentar substancialmente a agilidade de uma empresa [48].

O objetivo da flexibilidade na I4.0 encontra-se em consonância com o objetivo da Gestão Ágil. Este alinhamento está centrado na procura de vantagens competitivas através da integração de recursos reconfiguráveis e da implementação de melhores práticas num ambiente rico em conhecimento [33]. De acordo com alguns estudos, a utilização da tecnologia da I4.0 conduz a uma maior agilidade organizacional. Em contrapartida, salienta-se que a utilização da tecnologia I4.0 implica mudanças consideráveis na cultura empresarial e nas condições de trabalho. Consequentemente, a agilidade surgiu como uma condição fundamental para a aplicação efetiva das tecnologias I4.0 e para a integração harmoniosa da organização no presente ambiente industrial. Por último, a aplicação simultânea da agilidade e da tecnologia aplicável é fundamental para que as empresas se adaptem ao cenário atual [48].

Os paradigmas *Lean* e Ágil, ainda que essencialmente singulares podem coexistir eficazmente numa organização permitindo uma gestão eficiente e bem concebida. Este modelo híbrido designa-se "*Leagile*". O *Leagile* inclui um ponto de dissociação, que é crucial para conciliar estes dois paradigmas [49]. Este paradigma híbrido beneficia da abordagem *Lean*, a partir da otimização dos processos e redução de custos pois, foca-se numa procura mais constante e elimina a diversidade de produtos. A agilidade, por outro lado permite que a organização se concentre em responder a uma procura altamente variável, a várias ofertas de produtos e à flexibilidade para se adaptarem a situações de mercado voláteis [31, 50].

2.1.3. Gestão Colaborativa

De acordo com Camarinha-Matos [51], a colaboração é um processo multifacetado em que as organizações partilham conhecimentos, ativos e funções para, desenvolverem, executarem e avaliarem um conjunto de tarefas que visam atingir um objetivo comum e criar valor. Trata-se de um conjunto de entidades que aumentam as capacidades umas das outras, incluindo a assunção recíproca de riscos, recursos, deveres, perdas e recompensas e, se escolhido, a projeção de uma identidade conjunta para observadores externos. Quando se trabalha em conjunto num contexto de manufatura, a partilha de materiais ou recursos, desde maquinaria e equipamento de produção, a processos específicos, é um aspeto comum. Além disso, a colaboração pode envolver a troca de dados, conhecimentos ou experiências [52].

A gestão colaborativa é um novo modelo de negócio em que as organizações colaboram e utilizam as especialidades umas das outras para produzir um produto e melhorar o desempenho da rede de negócios como um todo. Existe uma necessidade crescente de pôr em

prática uma colaboração completa e abrangente, tendo em conta os obstáculos crescentes na economia global contemporânea [53].

A colaboração é essencial para as empresas por várias razões. Estas incluem as seguintes [53]:

- Sobrevivência competitiva - Para se manterem competitivas e prosperarem no mercado, as empresas têm de trabalhar em conjunto;
- Eficiência e agilidade - A colaboração dá às empresas as ferramentas para melhorar as suas ligações com parceiros, fornecedores e consumidores em termos de eficiência e agilidade, o que promove uma estratégia operacional mais reativa e eficiente;
- Otimização do negócio - Ao utilizar procedimentos inovadores e formar parcerias fortes com outras empresas da cadeia de abastecimento, a colaboração ajuda as empresas a aumentar as vendas e a diminuir as despesas operacionais.

Além disso, a gestão colaborativa é importante para capacitar pequenas e médias empresas (PMEs), superando limitações comuns de recursos e conhecimentos especializados. A formação de alianças temporárias alinhadas a objetivos específicos oferece uma abordagem flexível diante das mudanças nas demandas de mercado. *Collaborative manufacturing* é uma maneira eficaz para PMEs enfrentarem desafios, permitindo o aprimoramento de competências através do compartilhamento de recursos e participação como fornecedores de soluções integradas. Essa colaboração estimula a aprendizagem, troca de conhecimentos, e proporciona benefícios como a produção de bens complexos, expansão internacional no mercado e redução de custos de fabricação [53, 54].

As responsabilidades das empresas na gestão colaborativa sofrem uma alteração fundamental, passando de transações contraditórias para acordos de cooperação e colaboração. O reconhecimento de interesses mútuos e o desenvolvimento da confiança são os fundamentos desta mudança. A ideia de colaboração sugere que os membros trabalhem para melhorar o sistema como um todo. Consequentemente, as relações deixam de se basear em normas comerciais convencionais e passam a basear-se na confiança mútua, que é reforçada pelas contribuições e pelo desempenho [55]. O processo de colaboração inicia-se com a identificação de um problema, o que leva ao pedido de contribuições de diferentes partes que têm interesses, aspirações e objetivos semelhantes. O objetivo é determinar a melhor estratégia de colaboração para resolver problemas de engenharia ou operacionais. Implica esforços sincronizados e coordenados para criar e manter um entendimento mútuo de uma questão [56]. “*Timeliness*”, flexibilidade e adaptabilidade dos processos de fabrico são condições necessárias para o *Collaborative Manufacturing* [57].

A gestão colaborativa também apresenta uma oportunidade para revolucionar as atividades relacionadas com a conceção de produtos, o planeamento de processos e outras funções. Esta mudança afasta-se da comunicação lenta e iterativa de dados limitados sobre o produto para uma comunicação instantânea e rica em informação sobre o produto [58]. Fundamentalmente, a gestão colaborativa faz com que a partilha de informações passe de um estado passivo para um estado ativo e verifica se os objetivos de desempenho acordados estão a ser cumpridos [55]. As empresas estão cada vez mais a formar parcerias com mão de obra especializada em

colaboração. A capacidade de estabelecer tais parcerias torna-se então uma vantagem competitiva fundamental no prisma industrial [58].

A integração das atividades internas e externas é enfatizada pela gestão colaborativa na cadeia de abastecimento. Esta metodologia tem como objetivo combinar os esforços com as características distintas da cadeia de abastecimento, tendo em conta elementos como as distribuições regionais, as tendências da procura e as propriedades dos produtos [59]. As alianças comerciais formais ou o simples intercâmbio de informações sobre o processo empresarial são duas formas de reunir parceiros na rede da cadeia de abastecimento que podem beneficiar da gestão colaborativa [55]. A colaboração na cadeia de abastecimento é bastante vantajosa, pois permite reduzir os excedentes de inventário, a criação cooperativa de um ritmo comum de troca de informações, reabastecimento e sincronização de fornecimentos em todo o sistema [60].

Manupati et al., propõe as ideias/pilares fundamentais do conceito de colaboração para incentivar as práticas colaborativas que abrangem a servitização, a integração/ligação em rede, a digitalização e a descentralização, passíveis de serem observados na Figura 1 [61].



Figura 1 - Principais pilares do conceito de colaboração, adaptado de [61]

As características motivacionais da gestão colaborativa têm em conta as razões fundamentais para colaborar, baseando-se nos fatores e elementos facilitadores e motivadores no âmbito da gestão colaborativa. As empresas devem estar abertas a trabalhar em conjunto e compreender as vantagens que daí podem resultar. Os componentes do ambiente de trabalho conhecidos como facilitadores oferecem confiança e assistência para a implementação bem sucedida de esforços de colaboração entre empresas. Os elementos facilitadores principais são [59]:

- Compatibilidade tecnológica para a comunicação e o intercâmbio de informações - A compatibilidade dos dispositivos é necessária para uma comunicação eficiente e para a partilha de informações. O desenvolvimento da colaboração entre organizações depende da melhoria das tecnologias de comunicação e informação.
- Compatibilidade cultural e de gestão - As empresas que colaboram entre si devem ter objetivos semelhantes e um conjunto de valores comparáveis. Estes não têm de corresponder exatamente, mas não devem colidir, de modo a proporcionar uma base de gestão e compatibilidade cultural;
- Mutualidade – É um facilitador essencial, implica a troca de objetivos e de dados. Esta componente garante que todas as organizações participantes se comprometam com ações de cooperação e colaboração baseadas na confiança e no benefício mútuo, criando, em última análise, uma dinâmica vantajosa para todas as empresas.

Da mesma forma, a participação ativa de todas as partes é necessária para que a abordagem de colaboração possa ser implementada eficazmente e resolver os problemas. Isto exige confiança mútua, o que, por sua vez, requer tempo, esforço e atenção. Neste cenário, a avaliação das contribuições individuais das entidades para a criação de valor é crucial e torna-se muito mais complexa [51]. Além disso, a compreensão mútua é uma condição prévia para a colaboração num contexto industrial, e a compreensão mútua pressupõe a existência de uma linguagem de comunicação normalizada entre os membros da comunidade. A *Internet of Things* (IoT), por exemplo, é um indicador de como as redes de colaboração são desenvolvidas utilizando protocolos de comunicação como base fundamental [52, 62].

Segundo Bilbao, uma abordagem competitiva que utiliza a IoT, o envolvimento dos parceiros da rede de valor, o fluxo de trabalho orientado eletronicamente e as competências essenciais de fabrico é a Gestão Colaborativa. Com a tecnologia certa para apoiar os fabricantes, estes podem competir tornando-se empresas extremamente reativas e adaptáveis, capazes de satisfazer os consumidores e os parceiros da cadeia de valor. Nesta situação, uma colaboração eficaz exige a troca de informações de acordo com procedimentos e diretrizes estabelecidos que abrangem todo o ciclo de vida do produto [58].

A Gestão Colaborativa também inclui o termo de *open innovation*. Este significa que as ideias valiosas têm o potencial de ter origem dentro ou fora da empresa e podem ser introduzidas no mercado através de canais internos ou externos. A essência da *open innovation* reside na colaboração [63]. A colaboração desempenha um papel fundamental e vital entre as partes interessadas e as organizações durante o processo e o avanço da inovação. A "*openness*" da organização permite o fluxo de conhecimento, informação, recursos e tecnologia com atores externos, o que facilita parceria de colaboração [64].

Na atual era digital, as empresas devem alcançar um desenvolvimento sustentável através de uma sinergia entre a colaboração e a I4.0. A aprendizagem - e especialmente a co-aprendizagem - foi considerada essencial para colmatar o défice de cooperação com a I4.0. Além disso, o elemento humano desempenha um papel crucial na ligação entre estes dois domínios [52]. Em cenários de colaboração Homem-Máquina, este paradigma é relevante para as interações entre várias entidades, abrangendo não só recursos de fabrico ou máquinas partilhados, mas também

interações entre humanos e o seu envolvimento com máquinas [65]. A colaboração é um componente essencial da I4.0. A partilha de informações, a interoperabilidade dos sistemas de software e a cooperação humana fazem parte deste prisma [66].

A fusão das práticas ágeis e da colaboração é sublinhada nas metodologias que promovem o desenvolvimento de software, particularmente na filosofia do Manifesto Ágil. Esta filosofia acentua a importância das interações individuais, a adaptabilidade às mudanças e a colaboração entre clientes e equipas de trabalho [67]. Um ambiente de gestão ágil e colaborativo implica que os recursos de conceção e fabrico estejam ligados em rede, perfeitamente integrados e funcionem em conjunto dentro de uma empresa [68].

2.1.4. Gestão em Tempo Real

É cada vez mais importante acompanhar as informações em tempo real nas grandes empresas, para que os supervisores possam responder mais rapidamente às decisões de produção, o que aumenta a eficácia do sistema. Assim, a recolha e processamento da *data* em tempo real representa uma dificuldade acrescida no mundo moderno [69].

O paradigma de Gestão em Tempo Real não é uma novidade. Nos Estados Unidos, um sistema de gestão da informação em tempo real foi desenvolvido no final dos anos 50 para melhorar as capacidades de defesa aérea, marcando a primeira implementação operacional. A conceção do sistema de monitorização foi desenvolvida na década de 90, com o objetivo de permitir a gestão em tempo real, abordando circunstâncias invulgares de uma forma limitada no tempo [70]. Atualmente, a Gestão em Tempo Real é descrita como o processamento contínuo de dados num dado momento, em que as avaliações de desempenho refletem as circunstâncias do momento [70]. O controlo digital, a operação humana, as estruturas organizacionais e os processos físicos devem ser integrados em sistemas de Gestão em Tempo Real [71]. É um sistema personalizado que responde a determinadas situações externas de forma limitada no tempo [72].

De acordo com Putnik et. al [7], os recentes desenvolvimentos nas tecnologias de informação e comunicação alimentaram o paradigma da Gestão em Tempo Real. O desenvolvimento de objetos inteligentes, a tecnologia RFID, os dispositivos máquina-a-máquina (M2M) e as estruturas sofisticadas como a *Machinery Information Management Open System Alliance* são exemplos notáveis deste paradigma.

A adoção de um paradigma de gestão em tempo real é necessária para apoiar os processos vitais, nomeadamente quando se trata de variações externas dinâmicas. Melhora a rentabilidade, a sustentabilidade, a fiabilidade e a eficiência dos serviços [73].

A capacidade de os sistemas utilizados reagirem a eventos externos de forma atempada e previsível é o princípio essencial das aplicações em tempo real. Estas aplicações possuem prazos apertados, devido à necessidade de reação rápida perante as alterações do seu meio envolvente. Deste modo, um sistema totalmente preparado, uma programação de tarefas praticável e a capacidade de manter o desempenho em caso de avaria são algumas das características mais importantes de um sistema baseado em tempo real [72]. Os ajustes rápidos

do estado de uma linha de produção são possíveis graças a um sistema de captura de dados que os utiliza para produção em tempo real. Isto ajuda a garantir que a gestão da produção seja exata, transparente e controlada [74].

Para uma gestão em tempo real eficaz da produção, é necessário obter e utilizar informações precisas, completas e atualizadas sobre o processo de produção no seu conjunto. Para que os sistemas de sejam eficientes, os dados em tempo real devem ser perfeitamente integrados e utilizados para apoiar a tomada de decisões informadas e aumentar a eficiência operacional [74]. Os materiais e as informações sobre o *work-in-progress* são visíveis e rastreáveis em tempo real, o que facilita a identificação de estrangulamentos no chão de fábrica e, eventualmente, melhorar o da produção [75]. Desta forma, a recolha de dados exatos e o processamento rápido da informação são essenciais para o funcionamento contínuo e eficaz de um sistema em tempo real. A base para melhorar a assistência à gestão da produção e à tomada de decisões no âmbito do quadro operacional é estabelecida por este procedimento crucial [76].

Na Gestão em Tempo Real, o controlo tem vários elementos-chave e estão reunidos para proporcionar um funcionamento eficiente e sem falhas. Os conceitos fundamentais deste sistema complexo incluem a recolha rápida de dados, o processamento rápido, respostas rápidas e feedback rápido. Coletivamente, estes componentes constituem a base fundamental de um sistema avançado concebido para lidar com as dificuldades de fazer julgamentos rapidamente. Sendo assim, a recolha de informações e as técnicas de identificação automática são pontos fulcrais de toda a operação. A sua função não é apenas auxiliar, mas sim garantir uma recolha de dados fluida e instantânea. Esta característica permite ao sistema reagir rapidamente à evolução das circunstâncias. Esta estratégia é demonstrada por dois métodos importantes: os processos/máquinas acionados por sensores, os *Smart Devices* e a recolha por radiofrequência [70].

RFID, denominado de identificação por radiofrequência, é uma tecnologia sem fios, pouco dispendiosa, que permite a ligação de uma enorme quantidade de elementos em simultâneo. A capacidade de identificar, encontrar, transacionar e verificar entidades é proporcionada tanto aos consumidores como às empresas. Devido ao seu baixo custo e à necessidade de pouca manutenção, estes sensores são aplicáveis a uma variedade de situações, nomeadamente a produção e a logística [77]. A gestão global do ciclo de vida do produto/serviço pode ser possível com a integração de aplicações RFID antes, durante e após o processo de produção [74].

A incorporação da tecnologia RFID resulta na recolha e sincronização automática ou semiautomáticas de dados do chão de fábrica em tempo real. Deste modo, a fiabilidade dos dados é aumentada e as despesas relacionadas com dados errados ou com falhas são reduzidas. Sendo assim, pode ser usada para melhorar a qualidade e a produtividade no chão de fábrica [75]. Os RFIDs ao permitirem a recolha simultânea em tempo real de dados, habilita a gestão/produção em tempo real [69, 77]. Também, facilita a recolha e o processamento automático de informações em tempo real ao longo das operações de produção. A monitorização instantânea e precisa de ativos, processos ou objetos torna-se possível com a integração desta tecnologia no sistema [69].

A criação de sistemas de informação sobre a produção com rastreabilidade, visibilidade e interoperabilidade em tempo real tornou-se possível graças aos recentes desenvolvimentos no domínio da RFID [69].

Através da integração das tecnologias da informação e da comunicação com os ativos físicos de produção, como equipamentos ou bens, resultou na criação de *Smart Objects*. Estes objetos têm identidades únicas e são excelentes a interagir eficazmente com o seu ambiente. Têm a capacidade de recolher e conservar dados sobre si próprios e sobre o que os rodeia, de desempenhar um papel ativo na tomada de decisões, de vigiar e gerir o seu ambiente e de criar interações eficazes no âmbito de um sistema produto-serviço [78].

A base da Gestão em Tempo Real é estabelecida por estas tecnologias, que facilitam a construção e integração da IoT e permitem a monitorização em tempo real de todos os dados de produção, o tratamento da informação, a tomada de decisões e a emissão de ordens de execução [7], através de dispositivos que detetam e captam dados de produção em tempo real, transferindo-os conforme necessário [79].

A I4.0 e Gestão em Tempo Real apresentam alta compatibilidade. A quarta revolução industrial, atingiu a maturidade graças à IoT, que proporciona uma melhor ligação *wireless* para a recolha e o tratamento em tempo real dos dados de produção. A digitalização através da I4.0 procura proporcionar um ambiente industrial em tempo real, ao combinar a análise histórica e em tempo real com ênfase na “auto-otimização”. Este paradigma envolve o processamento rápido de dados e a descoberta de padrões, tendências ou anomalias utilizando ferramentas analíticas ou algoritmos, através do acompanhamento do processo de produção e utilização de ferramentas de ajuda de tomada de decisão baseadas em inteligência artificial (IA) e *Machine Learning*. Interações M2M, sensores e RFIDs são características comuns entre os dois conceitos [80].

Concluindo, a gestão em tempo real consiste essencialmente em tomar decisões rápidas com base na análise de dados em tempo real, através da comunicação eficaz e da adaptação contínua às circunstâncias em mudança. Os gestores podem responder a diferentes circunstâncias derivadas do meio externo com êxito e em tempo real e promover o progresso através da utilização de dados e de ações rápidas.

2.2. Indústria 4.0

O imperativo da indústria contemporânea é a digitalização e a *intelligentization* dos processos de produção [81]. As organizações devem adaptar-se constantemente aos desenvolvimentos tecnológicos para manterem a sua posição no mercado. Os gestores devem dar prioridade à melhoria da sua empresa e dos seus processos de fabrico devido à intensificação da concorrência em termos de eficiência e qualidade. A I4.0, muitas vezes conhecida como a Quarta Revolução Industrial, é o resultado do rápido avanço das tecnologias digitais, como os *Cyber-Physical Production Systems* (CPPS) e a IoT. A I4.0 Tem o poder de afetar vários níveis da estrutura organizacional e provocar grandes mudanças benéficas nas empresas [82].

Um maior grau de produtividade e eficiência operacional, bem como mais automação, são os objetivos da I4.0. A digitalização, otimização e personalização da produção; automação e adaptabilidade; interação homem-máquina; serviços de valor acrescentado; e intercâmbio automático de dados e comunicação são os cinco principais componentes deste conceito [83]. Para além de uma maior eficiência operacional, com a integração eficaz da IoT, *Cloud Computing* (CC), IA e da *Big Data* nos processos empresariais e de automatização, também é possível retirar benefícios económicos e ambientais [82].

De acordo com Vaidya [81], satisfazer as exigências específicas dos clientes é a principal finalidade da I4.0, que tem impacto em muitos sectores, como a administração de encomendas, a investigação e desenvolvimento, a entrada em funcionamento da produção, a entrega até a utilização e reciclagem de produtos.

A área da tecnologia da informação da Indústria 4.0 inclui CC, IoT e *Cyber-Physical Systems* (CPS). Especificamente, o CPS desempenha um papel fundamental na flexibilização de toda a produção [84]. Os sistemas de manufatura são capazes de controlar os processos físicos, criar um *digital twin* ou *cyber twin* do mundo físico e tomar decisões inteligentes, colaborando e comunicando em tempo real com máquinas, sensores, seres humanos e outros componentes. Este paradigma une processos de manufatura inteligentes com tecnologias de sistemas de produção integrados, anuncia uma nova era tecnológica que irá alterar significativamente as cadeias de valor da indústria e da produção e os modelos de negócio [85].

Torna-se também importante uma abordagem descentralizada, que privilegie a gestão autónoma de processos e objetos inteligentes em toda a rede. Este método encoraja a cooperação num certo número de procedimentos entre o mundo virtual e o mundo físico. A progressão dos processos integrados e a interação homem-máquina favorecem a transferência de dados entre as cadeias de valor, aumentando simultaneamente a complexidade e a agilidade [86].

O mercado de trabalho e as responsabilidades profissionais vão ser profundamente afetadas por este novo paradigma industrial. As futuras exigências de emprego requererão novas capacidades, pelo que devem ser criadas oportunidades para adquirir as competências necessárias através de uma formação de excelência. É imperativo assegurar que o número de empregos produzidos exceda o número de postos de trabalho que se podem perder, através da adoção deste conceito [87]. As pessoas não são substituídas pela tecnologia, mas sim capacitadas. O objetivo do progresso é beneficiar a sociedade e não causar danos [3].

Neste subcapítulo irá ser explorado as bases e os impactos dessa quarta revolução industrial, destacando as inovações tecnológicas que a definem e os desafios que ela apresenta.

2.2.1. Contextualização e Definição Histórica

A primeira era da industrialização ocorreu aproximadamente entre 1760 e 1840. Caracterizou-se por desenvolvimentos importantes, incluindo a construção de caminhos-de-ferro e o desenvolvimento da máquina a vapor, que inaugurou a era da produção mecânica. Com o advento da eletricidade e da linha de montagem, a segunda revolução industrial, que começou

no final do século XIX e continuou no início do século XX facilitou o fabrico em massa. A década de 1960 assistiu ao início da terceira revolução industrial, por vezes designada por revolução informática ou digital. Os desenvolvimentos nos semicondutores, os computadores *mainframe* nos anos 60, a computação pessoal nos anos 70 e 80 e a utilização generalizada da Internet nos anos 90 foram os catalisadores desta era revolucionária [3, 88].

A escala, alcance e complexidade da quarta revolução são os elementos diferenciadores relativamente às revoluções anteriores. A suas ramificações profundas, que têm impacto em todas as áreas, economias e governos, tornam evidente sua importância. A amplitude da quarta revolução industrial é mais vasta do que a dos equipamentos e sistemas inteligentes e ligados em rede. A combinação das tecnologias e as das suas interações com o mundo físico, digital e biológico distinguem a quarta revolução industrial das suas antecessoras [3, 88].

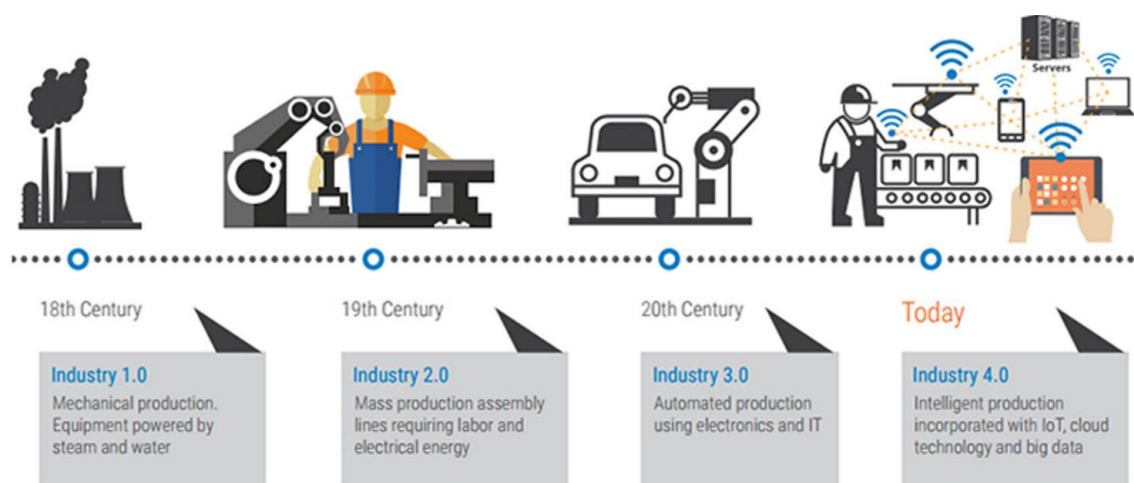


Figura 2 - Perspetiva histórica das revoluções industriais [88]

Primeiramente, o governo alemão apresentou a ideia e a frase "Indústria 4.0" na "Hannover Messe 2011" com o objetivo de construir fábricas inteligentes como o pináculo do *Smart Manufacturing*. Paralelamente, os Estados Unidos concentraram-se em políticas e programas nacionais para o *Smart Manufacturing* através de projetos como o "Fabrico Digital e Inovação de Design". Esta estratégia, também referida como *Advanced Manufacturing*, reflete a necessidade de manter a competitividade com outros países industrializados. A nível mundial, surgiu uma grande quantidade de projetos para abordar o tema da revolução digital na produção industrial. A Iniciativa da Cadeia de Valor Industrial no Japão, o Consórcio da Internet Industrial nos EUA e a "Plattform Industrie 4.0" na Alemanha são alguns exemplos [89, 90].

A transição da primeira para a quarta revolução industrial (I4.0) caracteriza-se por uma evolução no sentido da digitalização da produção e da aceitação do *Smart Manufacturing*. Os CPSs, a IoT, a *Internet of Services* (IoS), a IA, a *Big Data* e o *Smart Manufacturing* são alguns dos elementos essenciais da I4.0 que têm sido destacados. Estes componentes são vitais para o sucesso de uma empresa na indústria atual [91].

2.2.2. Princípios e exigências da Indústria 4.0

A eficaz criação e implementação de sistemas sustentáveis é possibilitada pelos princípios da I4.0, que permitem aos responsáveis pelo desenvolvimento de sistemas e aplicações integrar com êxito uma variedade de tecnologias da I4.0 [92]. Compreender os princípios e exigências básicas que regulam estas tecnologias torna-se essencial devido ao progresso da tecnologia incorporada na indústria moderna.

Deste modo, a I4.0 obedece a seis princípios orientadores, nomeadamente, interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade em tempo real, orientação para os serviços e modularidade [84, 93, 94]. Habib e Chimsom [92], introduzem um sétimo conceito designado *Ecodesign* para promover o desenvolvimento sustentável através do incentivo à adoção de tecnologias sustentáveis.

A associação destes conceitos juntamente com automação, otimização, agilidade e *Smart Products*, facilita a comunicação e a cooperação entre sistemas, a telemonitorização, a gestão automatizada e autónoma, o *Smart Manufacturing*, os serviços integrados e a proteção do ambiente [95]. Os sete princípios podem ser observados na Figura 3.

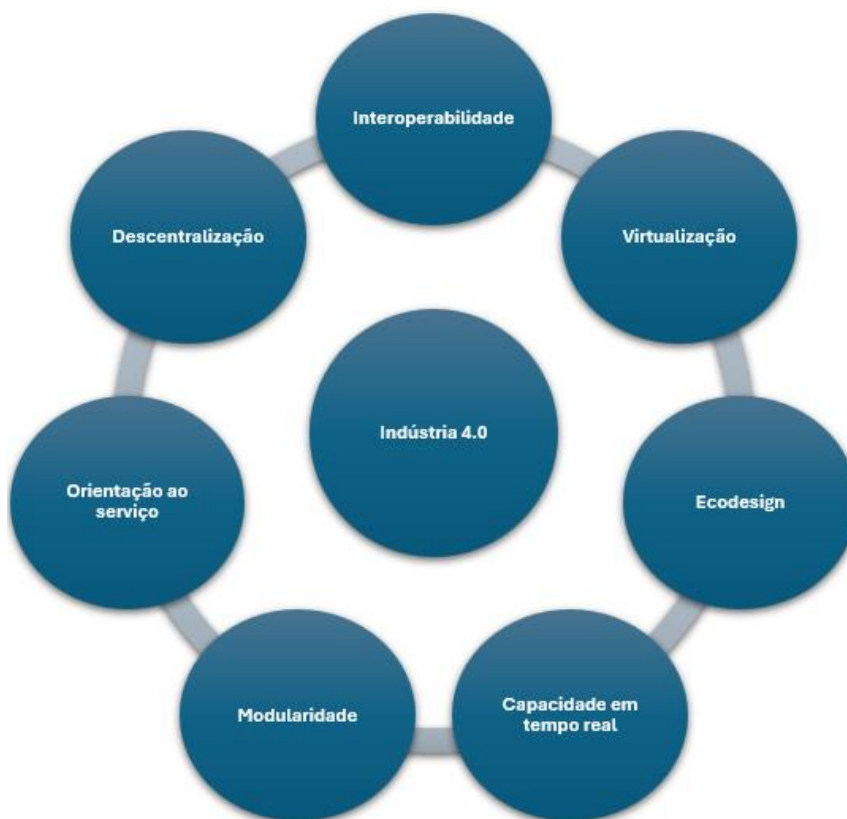


Figura 3 - Princípios da Indústria 4.0. adaptado de [92]

A implementação da I4.0 exige uma adesão rigorosa a estes princípios e demonstra a necessidade de uma compreensão adequada de cada premissa. A Tabela 2 resume cada princípio base e orientador deste paradigma.

Tabela 2 - Princípios e Exigências da Indústria 4.0

Princípios e Exigências da Indústria 4.0	Descrição
Interoperabilidade	É a capacidade de dois ou mais sistemas ou componentes partilharem informações e fazerem uma utilização prática dessas informações. Implica a utilização de uma estratégia diversificada e autónoma para combinar elementos de software, processos operacionais e soluções de aplicação [96].
Virtualização	Processo de duplicação digital do mundo real [84]. Permite a experimentação de cenários de layout, produção, programação e manutenção que, de outra forma, seriam difíceis de avaliar [97].
Descentralização	Ao contrário de um sistema centralizado, permite que as empresas, o grupo operacional e as máquinas façam as tomadas de decisão autonomamente [84, 98].
Capacidade em tempo real	Compreende a segurança funcional, a disponibilidade, a exequibilidade de manutenção, os sistemas de tolerância a falhas e a capacidade de resposta [92].
Orientação ao serviço	Implica uma reorientação do ênfase da venda de bens para a venda de serviços, o que redefine a forma como as empresas geram receitas [95].
Modularidade	Designa configurações adaptáveis que permitem a simples expansão ou substituição de módulos. Permite alterar a capacidade para acomodar variações na procura [99].
<i>Ecodesign</i>	Avalia as consequências que os produtos têm no ambiente como os efeitos das ferramentas, equipamentos e os materiais utilizados na conceção dos serviços [92].

Num mercado global cada vez mais digitalizado e interligado, as indústrias podem aproveitar novas oportunidades de redução de custos, vantagens competitivas e melhorias de produtividade através da adoção destes conceitos.

2.2.3. Modelo da Indústria 4.0

A I4.0, que integra os chamados nove pilares da tecnologia, está a revolucionar o sector industrial. Entre eles, a IoT e os CPSs destacam-se como as tecnologias mais representativas para as operações industriais [100]. Um fluxo de produção completamente integrado, automatizado e otimizado será criado a partir de unidades de produção segregadas e otimizadas através da utilização dos nove pilares da Indústria 4.0. Como resultado desta mudança, as ligações convencionais de produção entre fornecedores, fabricantes e clientes, bem como entre humanos e máquinas, são alteradas e a eficiência é aumentada [81]. Sendo assim, uma fábrica “tradicional” pode ser transformada numa *Smart Factory* com a ajuda destes nove pilares [100].

Rußmann et al. define nove características importantes do conceito, que ajudam a construir a visão da Indústria 4.0. *Big Data*, Robótica Autónoma, Simulação, Integração Horizontal e Vertical, IoT, *Cloud*, Fabrico Aditivo, Realidade Aumentada e Cibersegurança são os pilares considerados na pesquisa realizada [86, 101]. A inteligência artificial permite potencializar as tecnologias referidas [82].

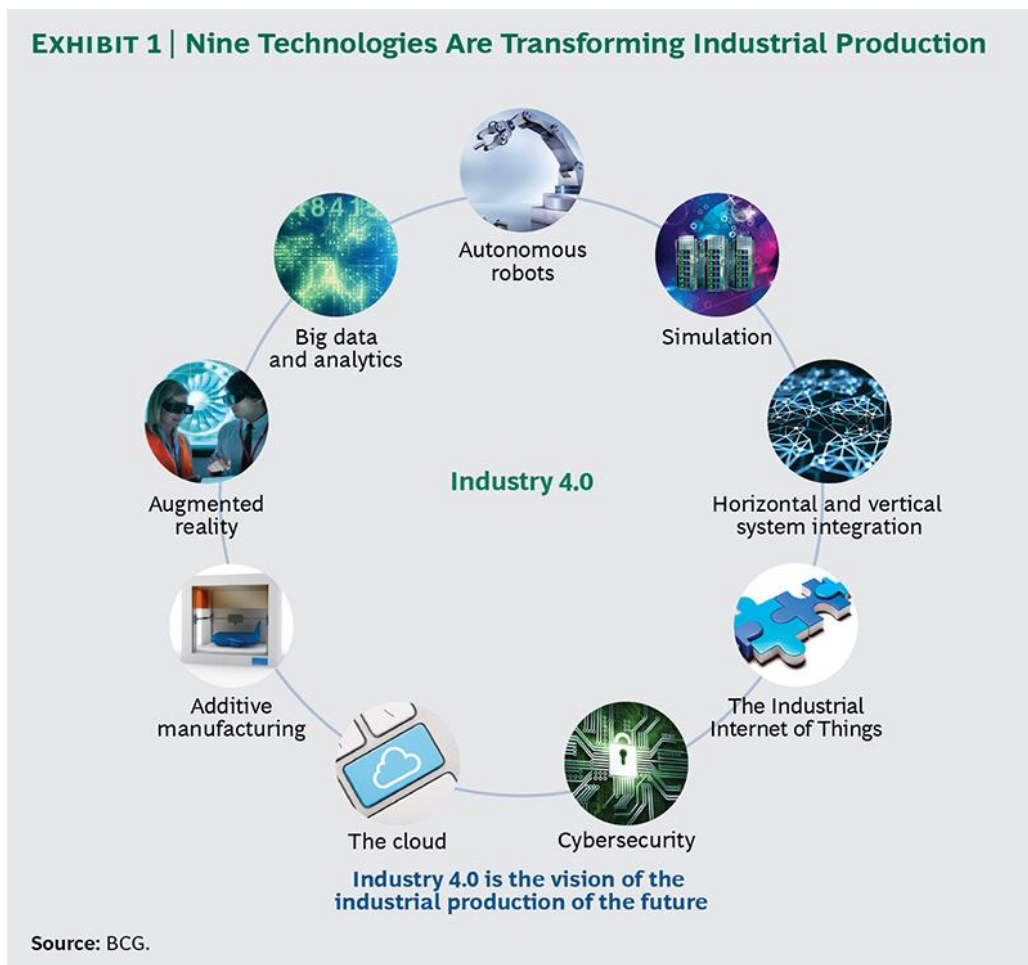


Figura 4 - Nove Pilares da Indústria 4.0 [102]

Este paradigma é um sistema tecnológico multifacetado que é influenciado principalmente pela digitalização do fabrico, ligação e integração. Destaca os benefícios da combinação de todos os componentes num sistema que acrescenta valor. As tecnologias de fabrico digital, automação, informática e comunicação em rede estão todas incluídas nesta ideia.

2.2.4. Sistemas Ciberfísicos (Cyber-Physical Systems – CPS)

Os sistemas ciberfísicos estão a tornar-se cada vez mais integrados com o avanço do tempo realçando a sua importância como um elemento fundamental da I4.0 [103]. Estes são redes de entidades de computação cooperativa que têm ligações estreitas com o ambiente físico e as suas operações contínuas. Utilizam e fornecem simultaneamente serviços de acesso e processamento de dados baseados na Internet [104]. Representam uma fusão entre o mundo físico e o mundo virtual, onde proporcionam uma transição suave entre os componentes digitais e físicos de um sistema ou ambiente, integrando o poder computacional nos processos físicos [105]. É comum descrever-se o conceito como "*cyberizing the physical*" e "*physicalizing the cyber*". Os CPSs demonstram capacidade de lidar com grandes volumes de dados combinados com os procedimentos corretos [106].

Na indústria transformadora, um CPS habitualmente realiza monitorização de processos e do desempenho em tempo real; gere com fiabilidade; configura, implementa e desativa em tempo real; com comunicação descentralizada e integrada, através de um comportamento autónomo capaz de tomada de decisões. Por conseguinte, existem duas partes fundamentais dos sistemas ciberfísicos [88]:

- Uma rede de sistemas e objetos: Cada componente tem um endereço e interage com os outros através da Internet;
- Um ambiente virtual: Este ambiente é criado através de simulação informática, reproduzindo objetos e comportamentos encontrados no mundo real.

Ao combinar estes componentes, os CPSs conseguem oferecer soluções para além das capacidades tradicionais [88].

Para conceber estes sistemas, é necessário um conhecimento profundo das interações entre computadores, software, redes e processos físicos. Os CPSs incluem software, plataformas de computação e modelos de rede, para além dos modelos de processos físicos. Sensores (ex: RFID), atuadores, dinâmica física, computação, programação de softwares e redes com congestionamento e atrasos de comunicação são alguns dos componentes que constituem o ciclo de feedback. Para monitorizar e regular os processos físicos através de circuitos de feedback são necessárias redes e computadores integrados [107]. Os componentes de aquisição de dados físicos de um sistema são essenciais para a recolha de dados de equipamentos dispersos na entidade. A precisão e a funcionalidade em tempo real da recolha de dados são garantidas por estes elementos. Com base nas necessidades dos serviços, estes componentes encaminham os dados recolhidos para a camada de processamento da informação. Em seguida, empregando tecnologias como o processamento de sinais estatísticos,

o processamento da segurança dos dados, a gestão da incerteza dos dados e os mecanismos de feedback; a secção de processamento da informação completa as tarefas especificadas [108].

As melhorias tecnológicas desempenham um papel importante no funcionamento dos sistemas ciberfísicos, mas a criatividade, adaptabilidade e capacidade de resolução de problemas dos intervenientes humanos são igualmente importantes. A interação e as competências humanas são tão essenciais para o funcionamento eficiente do CPS como as componentes tecnológicas [109].

Através da ligações entre sensores, atuadores e sistemas incorporados no mundo físico pelos CPSs, estabelece-se as bases para a IoT. Assim, é permitido o intercâmbio de dados e comunicação entre dispositivos ligados em rede em todo o ambiente digital.

2.2.5. Internet das Coisas (Internet of Things – IoT)

A convergência das comunidades digitais e físicas está a tornar-se cada vez mais integrada à medida que a IoT e outras tecnologias fundamentais prosperam na nossa sociedade [110]. A interligação de objetos físicos, incluindo automóveis, edifícios e outros objetos com sensores, atuadores, software, eletrónica e ligações de rede é conhecida como IoT. Estes objetos são capazes de interagir e recolher dados graças a esta integração [88]. É uma rede mundial de “coisas” interligadas, todas baseadas em protocolos de comunicação comuns e acessíveis individualmente. Sugere a existência generalizada de vários itens ou objetos que são capazes de cooperar e interagir uns com os outros para um objetivo comum, especialmente em ambientes industriais [111, 112]. Consequentemente, as empresas podem aumentar a eficiência, reduzindo os erros e acelerando os procedimentos. O desenvolvimento desta tecnologia depende da criatividade e de métodos adaptáveis, e representa a direção que a computação e as comunicações tomarão no futuro [113].

A utilização generalizada da tecnologia IoT é apoiada por três tendências tecnológicas globais: a facilidade de acesso à conectividade, especialmente à Internet; a capacidade de processamento dos sistemas informáticos atuais; e a combinação da computação em *Cloud* associada da *Big Data* permite um processamento e armazenamento de dados eficazes [114]. Atualmente o *Machine Learning* também é incorporado neste conceito [112].

Através da utilização da atual infraestrutura de rede, a IoT torna possível detetar e/ou operar dispositivos remotamente. Esta capacidade abre possibilidades para uma integração mais direta do mundo real com sistemas baseados em computação, o que pode resultar numa menor intervenção humana e numa maior eficiência, precisão e vantagens económicas. Este conceito engloba RFID para o rastreio de objetos, códigos de barras para uma identificação rápida e comunicação *wireless*, como Wi-Fi e Bluetooth, para uma comunicação sem falhas. Os sensores inteligentes melhoram a recolha de dados em tempo real, contribuindo para a eficiência e inteligência globais dos sistemas [115].

A IoT promove a produção sustentável através da minimização dos resíduos, da sensibilização para o consumo de energia e da promoção de um ambiente de trabalho mais seguro através da implementação de soluções de monitorização e manutenção em tempo real [116].

A *Industrial Internet of Things Industrial* (IIoT) é um subconjunto da IoT que inclui tecnologias de comunicação M2M e industriais, particularmente no que diz respeito a aplicações de automação [117]. A indústria transformadora pode explorar novas estratégias operacionais e alargar as suas aplicações atuais com a ajuda deste conceito [118]. A IIoT proporciona um meio para melhorar a compreensão do processo industrial, fazendo com a produção se torne mais eficaz e sustentável. Uma componente fundamental do *digital manufacturing* é a IIoT, que se centra na interconexão de todos os ativos industriais. Isto liga os sistemas de informação e as operações comerciais às máquinas e aos sistemas de controlo [117]. Melhora a entrega de produtos ou serviços, aumenta a produção, diminui os custos de mão de obra, utiliza menos energia e encurta o ciclo de fabrico até à encomenda [119].

Big Data Analytics é um componente fundamental, revelando padrões e conhecimentos a partir do enorme volume de informações gerado pelos dispositivos IoT.

2.2.6. Big Data

Com o objetivo de facilitar as tarefas operacionais e apoiar a tomada de decisões, as organizações precisam de converter os dados em informações. Atualmente, as empresas enfrentam uma concorrência intensa no mercado, o que as obriga a tratar rapidamente grandes quantidades de dados e a integrar dados críticos nas suas operações [120]. O termo "*Big Data*" refere-se a uma série de técnicas de gestão de recolha de dados em grande escala, incluindo a obtenção, movimentação, armazenamento, organização, pesquisa, avaliação e apresentação de dados, garantindo simultaneamente segurança e proteção da privacidade [121]. Este conceito refere-se à coleção de dados de grande dimensão e em rápida expansão em alta velocidade, de diferentes de formas. Os dados provêm de muitas fontes diferentes, incluindo sensores, sistemas de produção, controlos de máquinas e *inputs* humanos. O processamento de todos estes dados para extrair informações, padrões ou modelos úteis é essencial para a inovação sustentada [122]. Em suma, *Big Data* é definido como grandes quantidades de conjuntos de dados complexos e crescentes, obtidos a partir de várias fontes independentes [123].

Os grandes volumes de dados apresentam inúmeros desafios em vários sistemas, incluindo a aquisição de dados de automatização, a transformação de dados, a integração e modelação de dados, a gestão de dados IoT, o acesso em tempo real, a segurança, a privacidade e a *data analytics*. Para ultrapassar estes desafios, é necessária uma estratégia global e flexível que utilize tecnologias de integração avançadas [124].

Primeiramente, eram utilizadas três dimensões para definir grandes volumes de dados. Estas dimensões incluem o volume, a velocidade e a variedade (*V's*) [121, 123, 125]. O modelo atual acrescenta mais duas dimensões, nomeadamente veracidade e valor [125]:

- Volume - Refere-se a uma grande quantidade de dados, por vezes medida em exabytes (10^{18} bytes);

- Velocidade - Para responder às necessidades dos prazos de decisão, os grandes volumes de dados requerem métodos de tratamento rápido dos dados, como a inserção, a identificação e a retirada de uma base de dados;
- Variedade - Uma grande variedade de tipos de dados provenientes de muitos formatos e fontes constituem os grandes dados;
- Veracidade - Os grandes volumes de dados exigem sistemas que garantam a correção e a fiabilidade do enorme volume de dados;
- Valor - Os grandes volumes de dados referem-se a grandes quantidades de dados que têm o potencial de proporcionar mudanças significativas que beneficiam os serviços ou processos associados;

Assim, um *Big Data System*, é um sistema de software que utiliza algoritmos estatísticos e matemáticos em conjuntos de dados que representam as cinco dimensões (V's) para fornecer informação [125]. Laney introduz um sexto V, Variação, que diz respeito a mudanças tanto na estrutura como no conteúdo dos dados [126].

Uma vez que os dados na sua forma original têm uma baixa "densidade de valor", a *Big Data Analytics* centra-se em métodos de análise e desenvolvimento de valor. A ênfase é colocada na utilização da análise de dados para obter informações úteis que podem ser utilizadas [127]. A aplicação da tecnologia analítica e de *business intelligence* é fundamental para criar mais valor comercial, utilizando abordagens estatísticas e de extração de dados nas empresas [120]. A inovação sustentável na Indústria 4.0 depende em grande medida do tratamento de grandes volumes de dados que os converte em conhecimentos úteis [128].

Big Data e CC representam um ponto de viragem na evolução da gestão da informação e da capacidade de computação.

2.2.7. Computação em Nuvem (Cloud Computing - CC)

No domínio das tecnologias da informação, considera-se que a computação em nuvem representa uma mudança de paradigma [129]. CC, ou simplesmente *Cloud*, torna possível a utilização de computação utilitária, que é o aluguer em tempo real de recursos informáticos, tais como capacidade de processamento, armazenamento e recursos de rede relacionados [130]. Inclui o hardware e o software dos sistemas nos centros de dados que permitem a prestação desses serviços, bem como as aplicações que são fornecidas como serviços através da Internet [131]. É uma tecnologia que combina sistemas distribuídos, centralizados e paralelos, tornando assim possível o armazenamento enorme de quantidades de dados [132].

A computação em nuvem centra-se sobretudo na *Big Data Analytics*, utilizando hardware de base para criar *clusters* de computadores e aumentar a capacidade de trabalhos como a indexação e o rastreio da Web quando estão presentes grandes conjuntos de dados. Através do funcionamento simultâneo de componentes informáticos em vários locais, a computação em nuvem permite uma análise rápida através da distribuição de recursos informáticos pela Internet, tornando-a eficaz para o processamento de dados com utilização intensiva de tempo

e recursos [132]. Através da partilha contínua, a computação em nuvem melhora a eficiência da produção dos sistemas ciberfísicos [130].

A necessidade de despesas iniciais em recursos tecnológicos é reduzida com através do CC. Permite o aprovisionamento a pedido de capacidade de processamento e espaço de armazenamento, proporcionando versatilidade, agilidade e flexibilidade [133].

Edge Computing, em contraste com CC, refere-se a um serviço de computação descentralizado para aplicações, processamento e armazenamento. Tem lugar na extremidade da rede, atuando como uma camada intermédia entre os centros de dados da nuvem e os utilizadores finais. Ao reduzir a distância que os dados têm de percorrer na rede, este método minimiza os atrasos. Pensa-se que a computação periférica é uma forma de fazer a análise de dados perto das fontes de dados, a fim de otimizar o CC. Vários estudos indicam que a *Fog Computing* e a *Edge Computing* são frequentemente utilizadas indistintamente [132].

A necessidade de um elo no *continuum Cloud-to-Thing* deu origem a um paradigma de computação, designado por *Fog Computing* [134]. É um método descentralizado de processamento, armazenamento, controlo e ligação em rede baseado numa arquitetura emergente. Graças a esta conceção, estes serviços são distribuídos mais perto dos consumidores finais. Suporta requisitos de elevada largura de banda, baixa latência e elevada segurança [135]. Esta abordagem reduz os problemas associados à computação em nuvem tradicional, como as despesas gerais e os atrasos na transferência de dados [130].

Os recursos nas plataformas *Cloud* são escaláveis e adaptáveis, o que maximiza a eficácia das simulações que exigem muitos recursos.

2.2.8. Simulação

Uma das principais questões com que o sector industrial se depara é a produção de bens com um elevado nível de eficiência de recursos. A utilização de simulação tornou-se uma prática comum para atingir a máxima eficiência dentro de uma organização [136]. A utilização de modelos de um sistema de um processo real ou imaginado para antecipar o comportamento do sistema ou processo modelado para ter um conhecimento mais profundo do mesmo é conhecida como modelação por simulação [137]. Uma vez que a simulação envolve aspetos desconhecidos e é dinâmica, é um método fiável para lidar com problemas complexos que não são passíveis através de modelos matemáticos [136]. As simulações poupam tempo e recursos ao criar uma validação de um modelo antes de o desenvolver fisicamente. O modelo de simulação é utilizado para examinar diferentes possibilidades de conceção do sistema, permitindo que a alternativa com o melhor desempenho seja escolhida com base no modelo de simulação [138]. Assim, é possível a análise de vários cenários da I4.0 [95].

A simulação é mais do que apenas uma ferramenta de engenharia para o desenvolvimento no contexto da I4.0. Entre outras utilizações, são agora incorporadas em sistemas físicos para realizar sistemas inteligentes, conceber interfaces de fácil utilização e produzir simulações de formação [95, 139].

Existem dois tipos de simulação, nomeadamente a simulação offline e online. As decisões a longo prazo, como a conceção de instalações, podem ser tomadas com a ajuda da simulação offline, que permite a investigação de várias situações hipotéticas sem estar limitada por restrições temporais. No entanto, a tomada de decisões a curto prazo em processos operacionais como o controlo em tempo real e o planeamento de operações industriais, exige a utilização da simulação online. As variáveis importantes que afetam a simulação online incluem o número de entidades, a criação de eventos, a complexidade das atividades e o horizonte temporal da simulação [140]. A utilização de dados em tempo real cria modelos virtuais que representem com exatidão o mundo físico, incluindo pessoas, equipamento e produtos [84].

Um modelo de simulação integrado que inclui todos os principais subsistemas de uma fábrica é designado por *Virtual Factory*. Fornece uma assistência sofisticada à tomada de decisões e vê a produção como um todo. *Virtual Factory*, frequentemente designada por *Digital Twin*, é uma mudança de paradigma na modelação, simulação e otimização. Esta abordagem única ultrapassa a ênfase habitual nas fases de conceção e planeamento e aplica a simulação de forma mais ampla ao longo de todo o ciclo de vida do produto [141]. É uma simulação de fidelidade alta que combina dados do mundo real com modelos de simulação para melhorar a eficiência e a manutenção, utilizando dados reais para um melhor desempenho [140].

A passagem da simulação para a realidade aumentada no domínio industrial representa uma mudança significativa na forma como se percebe e interage com o sistema.

2.2.9. Realidade Aumentada (Augmented Reality)

Os colaboradores podem compreender mais facilmente os conceitos da I4.0 através da utilização da Realidade Aumentada, que permite aos mesmos estabelecer a ligação entre o mundo físico e o ambiente digital [142]. Esta tecnologia modifica a visão real do utilizador para sobrepor novas informações e melhora a perceção do mundo real. Essencialmente, os sistemas de realidade aumentada sobrepõem “aumentos” gerados por computador a objetos reais e permite que os aspetos virtuais e reais coexistam no mesmo domínio. Proporciona aos utilizadores uma profundidade perceptiva completa [143]. Estes sistemas fornecem uma variedade de funções, como a seleção de componentes de um armazém e o envio de instruções de reparação móveis. As indústrias utilizam a realidade aumentada para fornecer informações aos trabalhadores em tempo real, melhorando o fluxo de trabalho e a tomada de decisões [81].

A tecnologia em questão tem uma diversidade de aplicações, nomeadamente na formação de mão de obra qualificada; design, engenharia colaborativa; produção, no fornecimento de informação para trabalho de manutenção e montagem; operação, através de interfaces e manuais “aumentados”; serviços, vendas e marketing [140].

A Realidade Aumentada aplicada à indústria pode ser denominada de Realidade Aumentada Industrial. Esta facilita a localização dentro da organização, otimiza os processos industriais, melhora as operações de montagem e apoia as operações de manutenção. Facilita a gestão de materiais e a garantia de qualidade e atua como uma interface entre humanos e máquinas. Através da formação digital próxima do local de trabalho e da aprendizagem integrada, a

Realidade Aumentada também revoluciona a educação e a formação, aumentando a segurança, reduzindo as despesas e o tempo, e suportando uma gama de níveis de competências e velocidades de aprendizagem [144, 145].

A realidade aumentada pode ser utilizada como uma orientação automatizada para operações manuais executadas pelo operador [146]. A sua principal vantagem provém do *display user-friendly* que permite fornecer instruções de montagem e manutenção ao operador. Ao apresentar imediatamente as informações sobre o objeto a que se referem, esta estratégia melhora a eficiência e a compreensão do processo [147]. Os guias de Realidade Aumentada podem apresentar pormenores técnicos sobre dispositivos físicos no próprio espaço de trabalho. À medida que os processos se tornam mais complicados, as vantagens deste método tornam-se mais evidentes. Além disso, a investigação demonstrou deste conceito demonstrou que pode diminuir o esforço cognitivo associado à utilização de documentação técnica. A utilização da realidade aumentada é uma abordagem viável para criar documentação técnica que cumpra as normas da I4.0 [148].

Com uma navegação inteligente e autónoma, a automação e os robôs autónomos alteram a interação entre humanos e máquinas.

2.2.10. Automação/Robôs autónomos

São muitos os benefícios que podem ser obtidos com a automação na produção, entre os quais a simplificação dos processos e a otimização do fluxo de trabalho. Como resultado, é necessário menos tempo e as despesas em mão-de-obra são reduzidas. Pode melhorar o fluxo de trabalho global, reduzir os prazos de entrega, acelerar a produção e aumentar a qualidade dos produtos. Na I4.0, a automação, distinta do trabalho manual, engloba um conjunto de tecnologias que facilitam as operações da máquina e as funções do sistema com um envolvimento humano mínimo. Esta categoria inclui várias tecnologias como robôs industriais, dispositivos logísticos autónomos, dispositivos PLC, visualização de Controlo de Supervisão e Aquisição de Dados, painéis de Interface Homem-Máquina, entre outros. Em particular, a importância dos robôs reside na sua autonomia e programabilidade [149].

As tecnologias de automatização da produção com robôs inteligentes são um componente essencial da Indústria 4.0. A segurança, a adaptabilidade, a versatilidade e o trabalho em equipa têm prioridade máxima [150]. Os robôs são utilizados nas indústrias para efetuar trabalhos que são complexos para os seres humanos realizarem com facilidade [86]. Espera-se que, num futuro próximo, estes equipamentos comuniquem entre si, trabalhem em segurança ao lado dos operadores e que até adquiram conhecimentos a partir das interações humanas [84].

Os robôs autónomos, como os manipuladores autónomos, os veículos guiados autónomos e os robôs móveis autónomos, têm aplicações que promovem a flexibilidade industrial. Estes permitem modificações no processo para satisfazer uma série de requisitos de produção, como alterações no volume, atributos do produto e outras variáveis [151].

Para conseguir flexibilidade nos sistemas de produção, os robôs são cruciais, o que realça os benefícios da incorporação da IA. As capacidades dos robôs para computar, comunicar,

controlar, ser autônomos e envolver-se socialmente são melhoradas por esta integração, aumentando a eficiência da produção. A integração da IA melhora a capacidade das máquinas, o que acabará por resultar numa redução dos custos de produção [140].

A cooperação entre pessoas e robôs permite que estes sejam utilizados numa variedade de contextos, tais como tarefas de fabrico, logística e distribuição. Podem também ser controlados remotamente por seres humanos [86]. A ideia subjacente à robótica colaborativa é colocar os robôs na proximidade das pessoas. Uma certa classe de robôs conhecida como robôs colaborativos, ou “*cobots*”, é feita especificamente para se envolver em interação direta e prática com as pessoas, a fim de promover uma relação de trabalho cordial e cooperativa [140]. Assim, se contribui para a *Human-Robot Collaboration* (HRC). As organizações industriais podem beneficiar da colaboração homem-robô, que pode conduzir a uma maior produtividade, eficiência, resultados de maior qualidade e um ambiente de trabalho melhorado em geral [152].

A base da robótica autónoma tem uma ligação mutuamente benéfica com a IA, através da qual estes sistemas robóticos são potenciados pela integração de algoritmos, *Machine Learning* e processos cognitivos.

2.2.11. Inteligência Artificial (Artificial Intelligence)

A integração dos avanços da IA com os conceitos da I4.0 é congruente com o progresso desta tecnologia [153]. IA é descrita como a capacidade de uma máquina comunicar e reproduzir os comportamentos humanos [154]. Esta tecnologia refere-se à inteligência não humana que foi treinada para a execução de tarefas específicas, utilizando sistemas que imitam as capacidades cognitivas associadas às características humanas, como a aprendizagem, a fala e a resolução de problemas. É capaz de interpretar e aprender de forma independente a partir de dados externos, permitindo uma modificação flexível para atingir objetivos específicos [155]. Lida com as dificuldades ligadas ao tratamento de grandes quantidades de dados para extrair informações pertinentes. Implica a criação automática de algoritmos para lidar com questões complicadas, incluindo o pensamento, a observação, o planeamento, a aprendizagem e a manipulação de objetos [156].

As tecnologias aplicadas nas empresas com base na IA, estão a desenvolver-se rapidamente, e dão início a uma nova era de negócios e indústria. Estão a expandir o seu alcance para domínios anteriormente considerados exclusivamente humanos [155]. A IA é utilizada em muitos domínios diferentes, como a segurança, a configuração autónoma, o planeamento, o controlo e a monitorização, o diagnóstico e a previsão, e a tomada de decisões. Também é usualmente aplicável à reprodução de processos de produtos e ao acompanhamento do desempenho da fábrica [153].

Esta tecnologia apresenta características de acordo com os ideais e valores da I4.0, demonstrando sinergia entre estes dois conceitos, facilitando a sua integração no sistema. Autonomia, reatividade, proatividade, previsibilidade e cooperação humana [157]. A integração desta tecnologia na produção pode levar ao seu aperfeiçoamento e reduzir significativamente os custos associados [153].

A utilização da IA nas operações industriais tem várias vantagens. Agiliza o trabalho, produzindo resultados mais exatos com menos erros e esforços humanos. A sua análise melhora a qualidade do produto e o desempenho geral das instalações. A integração da IA e do *Machine Learning* proporciona um controlo de qualidade superior, normalização e manutenção, o que aumenta a produtividade e reduz as despesas operacionais [158].

Na I4.0 a utilização de técnicas de IA baseadas no conhecimento em conjunto com contributos do *Machine Learning* para efetuar juízos automatizados, pode advir benefícios. Quando estas tecnologias são integradas nas operações de dados, podem ajudar em muitas fases, desde a recolha e preparação de dados até à formação de modelos, o que leva a um aumento do valor comercial da empresa [159].

A aprendizagem automática (*Machine Learning*), é um subdomínio da IA. É definida como um conjunto de métodos para identificar automaticamente padrões nos dados [159]. Investiga e desenvolve algoritmos capazes de aprender com os dados e produzir previsões. Ao fornecer previsões baseados em dados, estes algoritmos ultrapassam os limites de instruções de programa estáticas e inflexíveis. Está diretamente relacionado com otimização matemática [160].

O *Deep Learning* é uma subclasse da aprendizagem automática que utiliza várias camadas não lineares para realizar tarefas, incluindo a extração de características, a transformação e a classificação de forma supervisionada ou não supervisionada [161]. Este domínio investiga as redes neuronais artificiais e os métodos integrados de aprendizagem automática com várias camadas ocultas. Os computadores que utilizam redes neuronais são programados para realizar tarefas de uma forma semelhante à dos seres humanos [160].

O *Deep Learning* aplicado à produção transforma as instalações em operações inteligentes altamente eficientes que minimizam o tempo de inatividade e aumentam a produção, enquanto reduzem os custos operacionais [160].

A Figura 5 sintetiza as relações entre os conceitos mencionados.

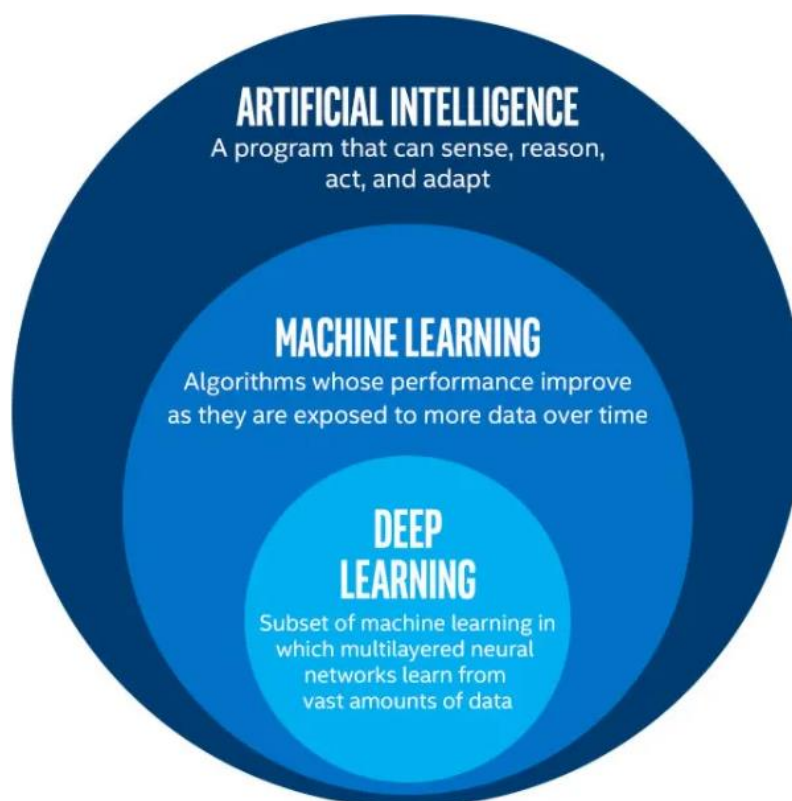


Figura 5 - Inteligência Artificial, *Machine Learning* e *Deep Learning* [162]

A rápida integração da AI em vários sectores também amplia as vulnerabilidades, exigindo uma exploração profunda da Cibersegurança.

2.2.12. Cibersegurança (Cyberscurity)

O sector industrial contém informações sensíveis sobre muitos aspetos das operações industriais, incluindo especificações de produtos, planos de negócios e informações empresariais [84]. As novas ameaças à cibersegurança surgem à medida que as infraestruturas vitais estão mais interligadas e integradas, exigindo uma deteção, investigação e atenuação proactivas antes de se tornarem preocupantes [163]. As questões de cibersegurança surgem nestes contextos industriais conectados em rede, devido ao facto de as fábricas e instalações estarem ligadas à Internet num esforço para aumentar a produtividade e a eficácia [164].

Para proteger os sistemas contra ameaças e vulnerabilidades, a cibersegurança recorre a uma série de medidas, métodos e meios [165]. É um conceito relativamente novo no domínio da segurança da informação de alto nível que alarga a sua definição para incluir ambientes industriais e a IoT. É um ramo da tecnologia que lida com a defesa, deteção e reação a diferentes tipos de ameaças, de modo a proteger os sistemas [140]. A capacidade de uma empresa se manter competitiva é reforçada pelo grau de maturidade da postura de segurança da organização. Como tal, integra-se perfeitamente nas operações, na estratégia e na conceção das empresas que adotam a I4.0 [164, 166]. Este conceito tornou-se um dos pilares fundamentais para grandes empresas do domínio público e privado [165].

Os ciberataques têm como objetivo comprometer a confidencialidade, a integridade e a disponibilidade de serviços, recursos ou sistemas ligados através de uma invasão do sistema [165]. Os sistemas ciberfísicos são mais suscetíveis a ataques em contextos industriais devido à utilização generalizada de dispositivos inteligentes, redes de sensores sem fios, protocolos da Internet, infraestruturas de computação em nuvem e tecnologias de análise de dados [167]. Os ciberataques aos sistemas de produção podem prejudicar as empresas de várias formas, tais como atacar infraestruturas críticas, causar a negação de serviço através da degradação de redes informáticas, roubar propriedade intelectual, violar leis de segurança e poluição e pôr em perigo a vida dos trabalhadores [166].

Sendo assim, é crucial implementar e atualizar regularmente os controlos de segurança implementados a vários níveis, a fim de manter a proteção atual [164]:

- Nível do dispositivo - instalar novos *patches* de segurança;
- Nível da rede - atualizar as características das *firewalls* para fazer face a novas ameaças;
- Nível da fábrica - vigiar e examinar as fontes reais de registo.

É necessária a criação de estratégias inteligentes de defesa que possam lidar com êxito com a variedade e a dinâmica dos ciberataques [165].

As empresas devem também sensibilizar todos os funcionários em relação à cibersegurança, a fim de evitar e diminuir os impactos dos ciberataques no desempenho da empresa, protegendo o conhecimento organizacional e o capital intelectual. Os programas de sensibilização e formação em cibersegurança informam os funcionários sobre as precauções de segurança que devem ser tomadas para salvaguardar dados sensíveis e oferecem detalhes sobre as políticas, regras e processos da empresa para melhor lidar com questões relacionadas à segurança cibernética [167].

Devido à quantidade de informação e dados gerada pela I4.0 é crítico a segurança dos mesmos. As empresas podem apresentar problemas de rastreabilidade inadequada da informação e suscetibilidade de falha do sistema. A incorporação da *blockchain technology* na cibersegurança, pode revolucionar a I4.0 ao fornecer uma nova ferramenta para aumentar a segurança e a eficiência dos sistemas [168]. Na sua essência, *blockchain* é um registo digital descentralizado constituído por blocos que representam trocas entre participantes. Pode ser caracterizada como uma base de dados distribuída que contém todos os eventos ou transações digitais executados e partilhadas entre os *stakeholders*. A cadeia de blocos funciona de forma descentralizada e apresenta enormes vantagens potenciais para a indústria [169]. A transparência e a rastreabilidade são duas das características intrínsecas da *blockchain technology* e aumentam a confiança nas transações.

Os sistemas de fabrico podem beneficiar das capacidades da *blockchain*, especialmente da incorporação de contratos inteligentes com fortes proteções de cibersegurança. Ao evitar interferências externas, estas características garantem um valor acrescido e custos de transação mais baixos. Ao atribuir a *blockchain technology* a dispositivos de rede, o sistema de comunicação distribui eficazmente a informação pelas máquinas, reduzindo as despesas com centros de dados de grandes dimensões. Esta tática limita o impacto de incidentes de *hacking*

a determinados nós ou canais, evitando interrupções na rede. A adoção da tecnologia blockchain também garante um rastreamento seguro e imutável dos dados industriais, resolvendo questões que anteriormente eram dispendiosas e demoradas [168].

Em suma, a utilização das tecnologias da I4.0 tem o potencial de aumentar as vantagens da cibersegurança, facilitando a criação de um ambiente seguro.

2.2.13. Integração Horizontal e Vertical de Sistemas

A integração vertical do sistema produtivo, a integração horizontal através de redes de valor e a integração da engenharia *end-to-end* ao longo do fluxo de valor são características da I4.0 [170]. A digitalização e a integração das cadeias de valor de *end-to-end* e das cadeias de produção verticais e horizontais são a força motriz I4.0. Permite as empresas compartilharem dados instantaneamente, incluindo detalhes de produtos específicos do local, produtividade dos trabalhadores em tempo real e o número de unidades produzidas. Além disso, facilita a partilha rápida de dados e o seu acesso [171].

A integração horizontal e vertical de sistemas facilita a colaboração e torna possível a implementação de uma cadeia de valor automatizada. Diferentes departamentos, atividades e funções podem ser ligados e integrados através da utilização de um sistema de rede de dados padronizado e universal [172]. Potencia todos os dados gerados para otimizar processos, reduzir custos e produzir produtos de qualidade superior [173]. Os sistemas de informação, a integração fornecedor/cliente e as interações externas fazem parte do fluxo horizontal. As operações internas da empresa, tais como departamentos, tecnologia, recursos humanos, estrutura e gestão, são abrangidas pelo fluxo vertical [174].

A integração horizontal descreve a forma como as redes de valor são integradas para promover a cooperação entre empresas ou organizações ao longo da cadeia de valor [15]. Descreve a integração de um recurso e de uma rede de informação com o objetivo de facilitar a colaboração empresarial e fornecer bens e serviços em tempo real [175]. Promove a colaboração entre empresas através da troca de recursos e dados em tempo real, sendo assim capazes de partilhar riscos, reunir recursos e adaptar-se rapidamente às mudanças no mercado que, por sua vez, as auxilia a beneficiar de novas oportunidades e possibilidades [176]. Ao acrescentar valor e racionalizar o fluxo de materiais, a integração horizontal confere à empresa uma vantagem competitiva [177].

A integração vertical, também designada por mapeamento da integração interna, consiste em analisar o sistema para determinar as regiões críticas que requerem um apoio específico [178]. Descreve a forma como os diferentes subsistemas hierárquicos de uma organização são integrados para criar um sistema de produção adaptável, ágil, eficiente e reconfigurável [174]. Representa a coordenação dos níveis de gestão e de produção considerando perspectivas da gestão da qualidade, da eficiência dos processos e do planeamento de operações, através do recurso de tecnologias de informação e comunicação [176, 177]. Os subsistemas hierárquicos informativos encontram-se ligados a um sistema ERP (Enterprise Resource Planning), que possibilita um sistema adaptável e reconfigurável e leva ao desenvolvimento de máquinas inteligentes [15].

Integração da engenharia *end-to-end* permite a criação de bens e serviços personalizados ao longo de toda a cadeia de valor. Define o modo como vários sistemas ou componentes funcionam em conjunto e sem descontinuidades ao longo de um processo ou fluxo de trabalho, desde o ponto de entrada até ao ponto de saída/conclusão [174]. Através de redes de colaboração, é necessária uma integração numérica completa em toda a cadeia de valor, pressupondo a digitalização em todas as fases, a fim de aumentar a personalização. Procura criar um ambiente unificado e eficaz em que muitas partes trabalham em conjunto de forma harmoniosa para beneficiar *stakeholders*, consumidores e colaboradores [175].

Em suma, a ligação de equipamentos, estações de trabalho ou fábricas independentes é denominada de integração horizontal. Implica também incentivar a cooperação entre as várias organizações envolvidas. Por outro lado, a integração vertical na produção implica a integração do planeamento empresarial, da gestão da produção, dos sensores, dos atuadores e dos controlos dos fornecedores aos clientes [171].

O fabrico aditivo ultrapassa os limites do pensamento tradicional, ao facilitar a integração horizontal e a integração vertical para operações de produção eficientes.

2.2.14. Fabrico Aditivo

No contexto da I4.0, o fabrico aditivo também conhecido como Impressão 3D, é um avanço tecnológico emergente. Utiliza modelos digitais (CAD) que são impressos em 3D, oferecendo opções de personalização e customização, e permite que diferentes produtos sejam feitos com os mesmos materiais. Além disso, ao utilizar um único processo, produz menos resíduos do que os processos tradicionais e assim promove a sustentabilidade [179]. Esta tecnologia, também maximiza a utilização dos recursos e procura aumentar a produtividade em sistemas de produção flexíveis. A utilização da tecnologia aditiva tem várias vantagens, uma vez que permite a modificação digital do produto antes do fabrico físico, o que reduz os *lead times*, a utilização de ferramentas e as necessidades de recursos. Ademais, promove o desenvolvimento de produtos mais personalizados, acelerando a inovação de novos produtos e facilitando as atividades de *co-design* [176].

O Fabrico Aditivo é comumente reconhecido como um elemento-chave da I4.0. A necessidade de técnicas de produção não tradicionais decorre da exigência de personalização e customização em massa. Como resultado, tem o potencial de se tornar uma tecnologia crucial na produção de bens personalizados devido à sua capacidade de criar itens complexos com características de desempenho elevadas [180]. De outro modo, a tendência crescente para o fabrico regionalmente disperso de baixo volume de artigos altamente personalizados, por oposição à produção em massa de uma pequena variedade de produtos centrada em algumas fábricas, pode levar a mudanças significativas na estratégia operacional, onde o fabrico aditivo se torna especialmente benéfico, pois confere flexibilidade, velocidade e eficácia de custos [181].

O fabrico aditivo apresenta implicações na gestão da cadeia de abastecimento devido à inerência das suas características. Em qualquer ponto da cadeia de abastecimento é possível produzir módulos, componentes e mesmo produtos finalizados graças a esta tecnologia. Isto

exige modificações na arquitetura da cadeia de abastecimento, o que representa um problema para as empresas de logística e resulta num menor número de camadas de fornecedores e de fornecedores em geral. Com esta estratégia, a flexibilidade da produção será melhorada, os prazos de entrega serão reduzidos, a personalização dos produtos aumentará e os níveis de inventário serão reduzidos [182].

A prototipagem rápida e os processos de produção extremamente dispersos são possíveis graças a esta tecnologia. A prototipagem rápida reduz os obstáculos à entrada no mercado e permite as pessoas e as pequenas empresas transformem ideias em objetos físicos. Isto promove a inovação e o empreendedorismo. A democratização da produção promove a inclusão, a diversidade e a inovação no sector, enquanto permite uma maior participação na economia global. Neste caso, o armazenamento, o transporte e os procedimentos de produção intermédios podem ser evitados enviando o modelo do produto diretamente para o local de "impressão" mais próximo do consumidor [183].

Apesar de ser uma tecnologia inovadora e disruptiva, devido à sua velocidade de produção relativamente reduzida, o fabrico aditivo ainda não é amplamente utilizado em empresas de grande dimensão e pode dar origem a *bottlenecks* [179]. Também apresenta dificuldades em simular com rapidez e precisão o processo de fabrico aditivo utilizando simulações numéricas baseadas na física. Nestas circunstâncias, a aplicação de modelos de *machine learning* orientados por dados, que se baseiam na compreensão física dos processos do fabrico aditivo, torna-se essencial. Mesmo com um conhecimento reduzido ou impreciso dos processos de fabrico aditivo, estes modelos permitem a otimização do mesmo [184].

Em suma, o fabrico de aditivo proporciona uma maior eficiência de produção e inovação. Facilita procedimentos expeditos, prototipagem rápida e personalização melhorada.

2.3. Análise Bibliométrica

A realização da análise bibliométrica foi utilizada para reunir um grande conjunto de dados de artigos científicos sobre o objetivo principal da dissertação, a análise comparativa de distintos paradigmas de gestão da produção, no contexto da Indústria 4.0. Esta análise vai derivar de uma busca provinda do *Web Of Science* empregando a *search query* seguinte: ("Industry 4.0" OR "I4.0" OR "Fourth Industrial Revolution") AND (("Lean Management" OR "Lean Manufacturing" OR "Lean Thinking") OR ("Agile Management" OR "Agile Manufacturing" OR "Agile") OR ("Collaborative Management" OR "Collaborative Manufacturing" OR "Collaborative Networks") OR ("Real-Time Management" OR "Real-Time Manufacturing" OR "Real-Time Systems")) com a opção *TOPIC* selecionada e um período de tempo que vai de 1900 a 2023. A pesquisa foi realizada em dezembro de 2023.

As palavras-chave da *query* que foram definidas tiveram por base a revisão bibliográfica anteriormente realizada e foram definidas 3 termos-chave para cada tema. Através da pesquisa efetuada verificou-se que os termos mais referidos na literatura são os que se apresentam na Tabela 3.

Tabela 3 - Palavras-Chave da Análise Bibliométrica

Indústria 4.0	Gestão Lean	Gestão Ágil	Gestão Colaborativa	Gestão em Tempo Real
Industry 4.0; I4.0;	Lean Management;	Agile Management;	Collaborative Management;	Real-Time Management;
Fourth Industrial Revolution.	Lean Manufacturing; Lean Thinking.	Agile Manufacturing; Agile.	Collaborative Manufacturing; Collaborative Networks.	Real-Time Manufacturing; Real-Time Systems.

Relativamente a outros termos referentes aos temas abordados, foram desprezados devido à baixa influência nos resultados da *query*.

Ao analisar a Figura 6, verifica-se que esta área de investigação é relativamente recente sendo que o primeiro artigo publicado é de 2015. Porém, tem vindo a crescer exponencialmente desde o início da segunda década do século XXI. As citações apresentam um comportamento semelhante. Totaliza um total de 788 publicações e de 11094 citações.

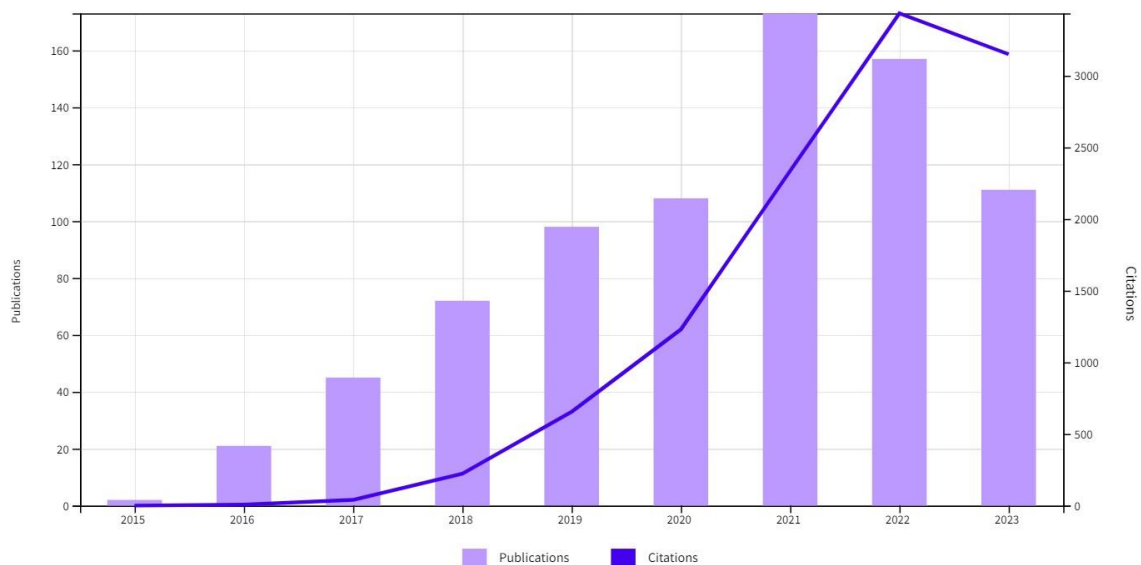


Figura 6 - Citações e publicações ao longo do tempo por ano

Através da Figura 7, observa-se que área com mais publicações neste tópico é “*Engineering Industrial*”, seguida de “*Engineering Manufacturing*”, “*Management*” e “*Computer Science Information Systems*”. É provável que as investigações sobre os paradigmas de gestão e a I4.0 conduzam a ligações antecipadas entre estes domínios. Tal deve-se às qualidades intrínsecas destas disciplinas, bem como à disponibilidade restrita de recursos no seu âmbito.



Figura 7 - Publicações em cada área de investigação

Na Figura 8, apresentam-se os termos que os autores utilizam mais frequentemente na literatura. Verifica-se que as palavras-chave/expressões mais usadas são “*Industry 4.0*”, “*Lean Manufacturing*”, “*Management*”, “*Implementation*” e “*Real-Time Systems*”. Estes termos apresentam elevada relevância devido à natureza intrínseca da pesquisa da área. A I4.0 e a Gestão *Lean* apresentam grande afinidade. Esta relação pode advir da metodologia *Lean* ser a mais investigada no ambiente da gestão da produção existindo conceitos de integração entre as duas filosofias como a *Lean Automation*. “*Management*” e “*Implementation*” também expõem alta correlação com a I4.0, visto que a aplicação deste novo paradigma digital pode facilitar tanto a gestão como a implementação/integração dos paradigmas nas organizações. Seguidamente, “*Real-Time Systems*” demonstra ser um termo de elevada importância neste contexto, devido às suas qualidades inerentes. As tecnologias associadas a este sistema também contribuem para esta relação visto que, a grande maioria também faz parte da I4.0. “*Collaborative Networks*”, “*Collaborative Manufacturing*”, “*Agile*” e “*Agile Manufacturing*” são termos que exibem uma menor relação, porém não significa que estes possuam baixa sinergia no contexto da I4.0. Este resultado pode provir de uma menor dimensão de artigos a contribuírem para esta pesquisa tendo em conta estes paradigmas. A dissertação posteriormente vai procurar responder a estas suposições. Esta análise foi possível através da utilização do *software* VOSviewer.

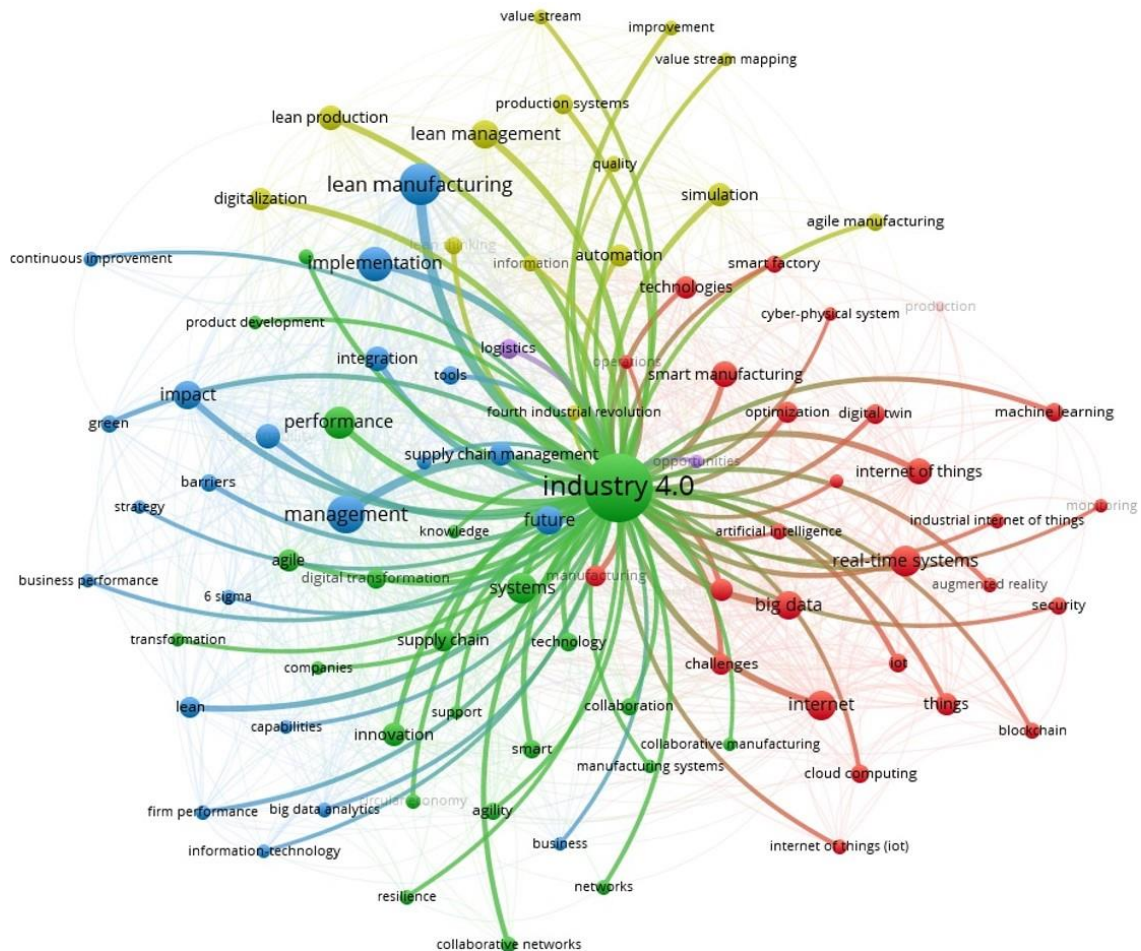


Figura 8 - Visualização em rede das palavras-chave mais usadas na literatura

2.4. Casos de Estudo

Nesta secção da revisão da literatura, será feita uma análise detalhada dos documentos relevantes. Será efetuada uma análise de quatro trabalhos fundamentais, com ênfase nas suas técnicas, conclusões e contributos. Estas análises aprofundadas criarão uma base sólida para a compreensão das nuances do tema. Depois disso, serão resumidas outras seis publicações com resumos sucintos das suas principais conclusões e aplicabilidade ao tema da investigação. Esta análise decorre a partir da análise bibliométrica anteriormente feita.

2.4.1. Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing

Este estudo explora as complexidades da ligação entre o *Lean Manufacturing* e a I4.0 e a forma que as ideias da I4.0 podem ser aplicadas neste contexto. Assim, esclarece os desafios que as empresas enfrentam quando adotam a I4.0 nomeadamente, o esforço financeiro necessário, bem como as vantagens por vezes menosprezadas. O artigo começa por definir o *Lean Manufacturing* e delinear os seus vários aspetos. Em seguida, é apresentada a definição de

Indústria 4.0, com especial atenção para o seu estado atual na Alemanha. Posteriormente, os obstáculos à implementação da filosofia *Lean* são examinados do ponto de vista da integração de recursos. A fim de descobrir conceitos de solução para superar os obstáculos enfrentados na implementação do *Lean*, o artigo estuda a literatura relevante para a Indústria 4.0. Através das conclusões do estudo, verifica-se que existem formas de ultrapassar os obstáculos à implementação do *Lean Manufacturing*, retiradas da I4.0. Revela que a adoção da I4.0 não só torna uma empresa mais “inteligente”, mas também intrinsecamente *Lean*. Assim a identificação de características específicas da I4.0 suporta várias facetas da produção otimizada [185].

2.4.2. The link between information and digital technologies of industry 4.0 and agile supply chain: Mapping current research and establishing new research avenues

Este estudo avalia a gestão ágil de cadeias de abastecimento através, daa integração das tecnologias digitais e de informação da I4.0. Assim, através da realização de uma avaliação exaustiva da literatura de 123 artigos selecionados, este estudo procura compreender a função e o significado das tecnologias digitais e de informação da I4.0 para a estratégia da *Agile Supply Chain*. Este artigo faz uma abordagem genérica da função e das consequências das tecnologias digitais e de informação I4.0 para a estratégia em questão, bem como a maturidade e as tecnologias emergentes neste contexto. Os resultados mostram uma correlação significativa entre as várias formas das tecnologias da I4.0 e a cadeia de abastecimento ágil. Conclui-se que ao melhorar a capacidade da cadeia de abastecimento ágil para reconhecer e reagir às mudanças no mercado e nas necessidades dos clientes, essas tecnologias podem ser benéficas [186].

2.4.3. Collaborative Networks as a Core Enabler of Industry 4.0

O principal objetivo deste artigo é analisar as características relevantes da I4.0, com especial incidência na descoberta de elementos de colaboração. Estes elementos são metodicamente delineados, tendo em conta qualquer contributo do sector das redes colaborativas. Além disso, o estudo identifica uma série de problemas em aberto como desafios de investigação nomeadamente, os relacionados com a colaboração contribuindo para o desenvolvimento da noção conhecida como "Indústria 4.0 Colaborativa". Fazem uma revisão dos conceitos da I4.0 e uma visão geral das redes colaborativas. Apresentam problemas de colaboração relacionados com a I4.0 na integração vertical e horizontal, na cadeia de valor, produção e modelos de negócio e na digitalização dos produtos e serviços. Seguidamente expõem os desafios futuros da investigação. Em suma, para satisfazer as exigências da I4.0, é essencial uma cooperação efetiva entre estruturas e processos organizacionais. A análise de elementos como a digitalização e a integração vertical revela dificuldades no trabalho em equipa [187].

2.4.4. Intelligent Small Object Detection for Digital Twin in Smart Manufacturing With Industrial Cyber-Physical Systems

Este artigo centra-se num modelo compacto de deteção de objetos para um *Digital Twin*, com o objetivo de alcançar a sincronização dinâmica em tempo real entre um sistema de produção físico e a sua representação virtual. Os principais parâmetros ambientais são considerados para representar e estimar características dinâmicas e alterações em tempo real na construção de um sistema *Digital Twin* genérico para uma fábrica inteligente. O modelo de rede neural profunda, foi concebido para identificar o estado em tempo real do ambiente de fabrico físico para o espaço virtual. É desenvolvido um algoritmo de aprendizagem para a deteção eficiente de pequenos objetos inteligentes, utilizando a integração e fusão de características das camadas superficiais e profundas. As experiências em três casos de utilização diferentes demonstram a eficácia e a utilidade do método proposto, alcançando uma maior precisão de deteção para o *Digital Twin* na produção inteligente. Contribui para tomadas de decisões em tempo real; monitorização, diagnóstico, prognóstico e manutenção em tempo real, visualização em tempo real e otimização em tempo real [188].

A Tabela 4 apresenta outros casos de estudo que foram objeto de análise.

Tabela 4 - Outros Casos de Estudo

Autores	Resumo
[189]	O artigo descreve quatro importantes pontos de vista de investigação sobre a ligação entre a I4.0 e <i>Lean Manufacturing</i> através de uma análise abrangente da literatura até agosto de 2017. Sugere agenda de estudos para orientar futuras investigações
[190]	A fim de manter a competitividade na era da I4.0, este estudo procura demonstrar como as PME's podem utilizar os seus recursos de Tecnologias da Informação para desenvolver um sistema de produção <i>Lean-digitized</i> . Indica que um plano estratégico da empresa para gerir a digitalização tem a capacidade de melhorar a compreensão e implementação da digitalização.
[191]	Este artigo, investiga cinco fábricas de dois grandes fabricantes de automóveis. A análise identifica os obstáculos e traça um roteiro para a implementação do conceito de fábrica inteligente. É proposto um projeto de modelo de maturidade, centrado em três elementos-chave: capacitar os funcionários com competências digitais; implementar processos, metodologias e filosofias ágeis e adotar tecnologia modular.
[192]	Este estudo examina 280 PME's de <i>smart manufacturing</i> e avalia os efeitos dos modelos de ajustamento automático (agilidade, adaptabilidade e ambidestria) na inovação digital. Centra-se nos sistemas digitais das PME e destaca a forma como as soluções de ligação em rede e de <i>open innovation</i> permitem um equilíbrio entre exploração e aproveitamento, com uma forte capacidade ágil.

[193] Neste artigo, é apresentado um modelo para a integração dinâmica de serviços e componentes de fabrico numa rede colaborativa de empresas. A fim de promover a colaboração e elevar os padrões de serviço, os principais objetivos são maximizar o cumprimento do serviço e minimizar a partilha desnecessária de serviços/componentes. A eficácia da estrutura na melhoria das organizações colaborativas em rede é demonstrada através de testes numéricos, que também cumprem os requisitos da I4.0 em termos de orientação para o serviço, modularização e agilidade.

[194] Esta investigação explora a literatura sobre gémeos digitais, realçando a forma como podem melhorar os sistemas industriais inteligentes. Os tópicos importantes abordados incluem o seu impacto na conceção de processos, na tomada de decisões, na gestão do ciclo de vida e o seu papel como catalisador para a adoção de conceitos industriais contemporâneos. A literatura destaca questões atuais, como os sistemas em tempo real e as tecnologias da I4.0, em consonância com a noção de sistemas industriais inteligentes como um todo e sugere novas vias de estudo no domínio dos gémeos digitais.

2.5. Caminhos Futuros

Esta secção analisa as potenciais direcções para a literatura futura, enfatizando a necessidade imperativa de investigação que integra eficazmente os conceitos da I4.0 com a Gestão *Lean*, a Gestão Ágil, a Gestão Colaborativa e a Gestão em Tempo Real. O objetivo é estabelecer um quadro de gestão organizacional abrangente, garantindo o alinhamento entre os planos e os avanços tecnológicos. A investigação futura deve dar prioridade ao desenvolvimento de tecnologias inteligentes que apoiem a tomada de decisões em tempo real e a automatização de processos. É vital criar um ambiente em que as metodologias *Lean* e *Agile* se integrem sem problemas. Isto implica melhorar as ferramentas de colaboração, explorar o impacto da IA na tomada de decisões e promover uma cultura de colaboração. Além disso, deve ser analisada a forma como a gestão integrada influencia as organizações, sugerindo a transição de estruturas rígidas para estruturas flexíveis. Neste contexto, os sistemas de formação contínua são essenciais tanto para os colaboradores como para toda a empresa. A análise bibliométrica realizada revela uma escassez de literatura sobre a avaliação da sinergia entre a I4.0 e a Gestão Colaborativa e a Gestão Ágil, tornando-a uma via crucial para investigação futura. Apesar da elevada correlação entre os Sistemas em Tempo Real e a I4.0, a informação existente é demasiado genérica, o que dificulta a procura de evidências da sua relação. Esta deve “caminhar” para ser mais clara.

2.6. Análise Crítica da Revisão da Literatura

Esta revisão da literatura ofereceu uma análise exaustiva dos principais paradigmas de gestão, incluindo a I4.0, Gestão *Lean*, Ágil, Colaborativa e em Tempo Real. A fusão destas metodologias

distintas revela um domínio flexível na gestão, motivado pelas exigências em mudança constante derivadas do espaço empresarial e social atual.

Através da implementação de uma estratégia integrada que incorpora aspectos da I4.0 nos paradigmas de gestão abordados contribui para a resolução das complexidades do meio empresarial e social contemporâneo. Um arquétipo composto por vários paradigmas, próprio para uma determinada configuração organizacional e necessidades específicas, permite uma estratégia e suporte completo, a nível de flexibilidade e eficiência.

Em suma, para melhorar a eficiência operacional, as abordagens de gestão como a Gestão *Lean* centram-se na redução do desperdício e no incentivo à melhoria contínua. A Gestão Ágil, valoriza a cooperação e a adaptação para lidar com as mudanças nas condições do mercado. A Gestão Colaborativa promove a partilha de informações e a colaboração como formas de estimular a inovação (*open innovation*). Na Gestão em Tempo Real a tecnologia é empregue para tomar decisões rapidamente utilizando dados atualizados em tempo real. A I4.0 incorpora tecnologias digitais por exemplo, a automação e a IA nas operações industriais para aumentar a produtividade e promover a inovação.

Assim, a análise e a integração constante destes paradigmas de gestão serão essenciais para as empresas que procuram obter uma vantagem competitiva e sustentável no panorama empresarial. A integração de diversos paradigmas de gestão realça a importância de uma estratégia global que combine as vantagens de cada conceito.

3. Exploração de Interconexões

O seguinte capítulo foca-se na síntese dos conhecimentos existentes para uma compreensão pormenorizada dos componentes anteriormente abordados. Sintetizar esses conhecimentos é fundamental para entender detalhadamente as interconexões entre os elementos que compõem estes temas. Ao analisar e consolidar as informações disponíveis, podemos identificar os pontos-chave e as relações entre diferentes conceitos, facilitando uma compreensão mais abrangente e aprofundada.

3.1. Benefícios da Implementação de Diversos Conceitos

A estratégia *Lean* incentiva a simplificação do fluxo de processos e permite o pleno potencial dos trabalhadores. Os seus princípios diretivos baseiam-se na redução de custos, ao assegurar que a organização mantém apenas o número essencial de recursos e minimiza os desperdícios, enquanto constrói um ambiente que permite aos trabalhadores desenvolverem plenamente as suas competências e potencialidades. A capacidade de adaptar rapidamente vários aspetos das operações do processo produtivo é importante na aquisição de uma vantagem competitiva. Devido à sua simplicidade, a adoção da gestão *Lean* é mais comum que os outros paradigmas abordados na dissertação. Permite a resolução rápida de problemas pela reação proporcionada pelas ferramentas inerentes a este paradigma, com por exemplo, a gestão visual. Estas ferramentas contribuem para a redução da heterogeneidade global do sistema de produção e privilegia a eficácia e a simplicidade das operações. Em suma é essencial para melhorar a fiabilidade e qualidade perceptível dos produtos e serviços para o cliente.

O *Lean Management* oferece a organizações de todas as dimensões e sectores, inúmeros benefícios, com ênfase na eliminação dos desperdícios e maximização do valor criado. Através da otimização dos processos e eliminação de etapas desnecessárias, e do tempo perdido nas mesmas, é melhorada a eficiência operacional. Ao reduzir a duração dos ciclos dos processos e ao eliminar as tarefas sem valor acrescentado, diminui também o *lead time*. Devido à aplicação de filosofias que visam minimização de desperdícios, que ajuda as empresas a reduzir as despesas associadas ao excesso de stocks, à sobreprodução, a falhas e a processos inúteis, leva, conseqüentemente, a uma redução de custos, enquanto promove um crescimento sustentável, concentrando-se na criação de valor a longo prazo. Incentiva a simplicidade e a gestão visual para uma melhoria no ambiente de trabalho e envolvimento dos colaboradores, com recurso às ferramentas *Lean*. A implementação do *Lean* implica baixa variabilidade nos produtos, serviços e processos da organização para proporcionar fluxos de produção estáveis e assim

umentar a fiabilidade de todo o sistema produtivo, como também dos produtos e serviços resultantes do mesmo.

Na sua essência, o *Lean Management* oferece uma estratégia holística para melhorar as organizações, com o objetivo de maximizar o valor para o cliente e reduzir o desperdício em todas as áreas da empresa. Por outro lado, a Gestão Ágil proporciona uma base flexível para a adaptação à mudança. As organizações podem melhorar a sua capacidade de produzir valor de forma rápida e eficaz através da implementação de abordagens ágeis.

A base da Gestão Ágil é constituída por uma série de ideias, incluindo a inovação constante, a adaptação contínua dos produtos às exigências dos clientes, períodos de entrega mais curtos, o alinhamento dos processos e das pessoas e, conseqüentemente resultados fiáveis. Ao trabalhar com inovações, o *Agile* procura alcançar um desempenho e resultados ótimos com o mínimo de trabalho. Os conceitos ágeis privilegiam a cooperação entre equipas multifuncionais, o desenvolvimento iterativo e o feedback constante para permitir modificações rápidas com base na evolução das exigências dos consumidores e das realidades do mercado. Também faz a incorporação dos clientes no processo de desenvolvimento de produtos para melhorar o valor do produto ou serviço de acordo com as necessidades e objetivos do cliente. Isto implica a utilização de ciclos de desenvolvimento curtos, de modo a fornecer rapidamente alterações incrementais. Assim a empresa reduz os riscos do projeto e melhora os seus bens e serviços, ao procurar o contributo das partes interessadas.

A Gestão Ágil realça a capacidade de se adaptar rapidamente às mudanças, de fornecer valor aos clientes e de promover uma cooperação multifuncional produtiva, oferecendo uma série de vantagens competitivas às organizações. A Gestão Ágil facilita a adaptabilidade e flexibilidade das organizações para se ajustarem à evolução dos dados e necessidades dos consumidores, das condições de mercado e dos requisitos, enquanto acrescentam valor aos produtos e serviços na perspetiva do cliente. Como resultado, as equipas podem oferecer valor mais rapidamente e adaptar-se rapidamente às mudanças (rápida reação). Devido à sua abordagem incremental e aos ciclos de feedback, permite a identificação precoce, a atenuação dos riscos e diminui a probabilidade de falhas significativas do projeto. Além disso, a abordagem incremental permite que uma versão primitiva do produto seja entregue ao cliente com as principais funcionalidades disponíveis, fornecendo assim valor antecipadamente e ao logo do desenvolvimento do projeto de forma mais rentável. O *Agile* também procura capacitar as equipas de trabalho ao permitir que estas façam correções e ajustes para o aumento das taxas de sucesso global do projeto.

Fundamentalmente, a Gestão Ágil é uma estratégia iterativa e centrada no cliente com o propósito de melhorar o desempenho do projeto e capacitar equipas de trabalho, capazes de responder eficazmente a problemas e oportunidades num ambiente em constante mudança. Todavia, a Gestão Colaborativa promove uma cultura de trabalho em equipa, comunicação e tomada de decisões partilhada entre todos os *stakeholders*.

A Gestão Colaborativa transforma a dinâmica inter-organizacional, traduzindo-se em esforços de colaboração entre empresas que constituem um meio de alavancar o potencial coletivo e promover o sucesso das empresas. O aumento da inovação e do crescimento do mercado, a

redução das despesas e a resolução acelerada dos desafios são um dos muitos benefícios deste paradigma. Abrange desde a cocriação de bens e serviços até à partilha de recursos e conhecimentos, contribuindo para a sinergia e cooperação. Permite que as organizações solucionem problemas complexos, beneficiem das oportunidades emergentes e acelerem o crescimento coletivo, enquanto potenciam as forças e talentos de cada organização. Para além do crescimento coletivo, também promove o crescimento e o desenvolvimento individual da organização e individual dos colaboradores, facilitando a criação e evolução de empresas robustas e adaptáveis a um mercado em constante mudança, através de um aumento da criatividade, da inovação, da participação dos trabalhadores e da produtividade. Estas atividades promovem um ambiente de comunicação aberta, confiança e capacitação na cultura do local de trabalho (intra-organizacional).

A gestão Colaborativa habilita o potencial da inteligência coletiva e expande o âmbito das ideias e perspetivas, ao estimular a co-inovação, co-aprendizagem e a cocriação de valor. Torna-se uma vantagem competitiva visto que, a possibilidade de prestar produtos e serviços partilhados de forma cooperativa aumenta a probabilidade de encontrar a combinação ideal para cada componente e serviço. Ademais, a Gestão Colaborativa não necessita de grandes investimentos pois maximiza a utilização dos recursos existentes e a colaboração externa e interna da organização para a colmatação de fraquezas e falhas potenciais durante o desenvolvimento do produto/serviço. Ao mobilizar todos os seus recursos disponíveis conjuntamente com a cultivação de uma cultura colaborativa de aprendizagem e inovação e com foco na resposta aos mercados dinâmicos atuais, apresenta altos níveis de adaptação ágil e flexibilidade demonstrando a sua capacidade competitiva. Outra componente destacável é a mitigação de riscos. As organizações podem atenuar a sua vulnerabilidade individual de insucesso ou a desafios imprevistos, ao distribuir responsabilidades e riscos através da colaboração. Ao trabalhar em conjunto, o risco é repartido por várias partes e facilita a adaptação às mudanças nas do mercado. Através da utilização do conceito de partilha também existirá uma dispersão de custos por vários parceiros entre as organizações envolvidas e assim, pode-se adquirir uma maior eficiência e reduzir as despesas operacionais. Os esforços de colaboração e partilha contribuem para uma maior satisfação dos *stakeholders* pois estas são incorporadas em várias partes do projeto, o que leva a um sentimento de inclusão. Estes fatores promovem, em conjunto, a descentralização e a distribuição dos processos de produção.

De forma geral, a Gestão Colaborativa fornece uma estratégia abrangente para melhorar as empresas, realçando a responsabilidade partilhada e o trabalho de equipa para maximizar o valor para o cliente e minimizar as ineficiências nas organizações envolvidas. Contudo, a Gestão em Tempo Real coloca uma forte ênfase na tomada rápida de decisões, em modificações rápidas em tempo real e na monitorização contínua para maximizar os resultados, os recursos e os processos.

A Gestão em Tempo Real é uma estratégia dinâmica de gestão que implica a adaptação rápida às circunstâncias em mudança. Através deste princípio, podem ser utilizados dados de estado em tempo real com a propriedade de serem rapidamente atualizados e de elevada precisão para detetar e prever falhas no sistema produtivo. Assim, é permitido aos gestores reagir rapidamente, possibilitando processos contínuos de personalização e otimização. Por causa da

deteção antecipada de irregularidades na produção e de diagnósticos futuros de apoio, as empresas podem reduzir as perdas e despesas presentes nos processos de produção e melhorar também a fiabilidade dos produtos e serviços. A Gestão em Tempo Real envolve a resolução proactiva de problemas e ações preventivas, para além da simples resposta aos problemas.

A Gestão em Tempo Real, através da utilização da tecnologia e da análise de dados, permite aos gestores maximizar as operações e aumentar a produtividade. A avaliação contínua de dados obtidos, a deteção de padrões e a ação imediata para resolver problemas ou aproveitar oportunidades. Tomada de decisões, ferramentas de monitorização de ponta e acesso rápido a dados fiáveis são essenciais para uma gestão eficaz em tempo real. Identificação rápida de desvios, anomalias ou estrangulamentos torna-se uma vantagem competitiva porque a deteção precoce destas adversidades reduz o impacto dos problemas operacionais e permite uma intervenção proactiva para evitar o seu agravamento, assegurando o bom funcionamento, a melhor utilização dos recursos disponíveis e leva a um melhoramento da eficiência operacional. Ao identificar precocemente desvios, anomalias ou estrangulamentos a mitigação de riscos é uma das principais vantagens da Gestão em Tempo Real. Os riscos ao serem mitigados existe uma diminuição de custos. Para além disso, o acesso a dados em tempo real e precisos, permite aos gestores tirar conclusões criteriosas sobre o comportamento da empresa e do seu envolvente. Estes conhecimentos apoiam o crescimento da empresa e servem de base para a tomada de decisões estratégicas e rápidas, viabilizando a otimização e previsões inteligentes. A fiabilidade do produto, conseqüentemente irá melhorar devido à deteção de problemas de qualidade antecipados correspondente a produtos defeituosos. Finalmente, as organizações podem sincronizar as operações de produção com a procura em tempo real com a ajuda da gestão em tempo real. Podem modificar dinamicamente os planeamentos de produção para fabricar artigos exatamente quando são necessários, obtendo assim uma resposta rápida à mudança das necessidades do clientes e mercado.

Em suma, ao utilizar dados e informações em tempo real, as organizações podem aumentar a sua competitividade, eficiência e agilidade, através da melhoria das operações, redução dos riscos e promoção do desenvolvimento contínuo. As tomadas decisões rápidas e mais “produtivas”, prestam um melhor serviço ao cliente e simultaneamente poupando reduzindo nos custos.

Na Tabela 5 é possível observar uma síntese de todas as ideias anteriormente referidas para todos os paradigmas abordados.

Tabela 5 - Benefícios dos Diferentes Paradigmas de Gestão

Paradigmas de Gestão	Benefícios
Gestão Lean	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminação dos desperdícios e maximização do valor criado; • Redução de custos; • Fluxos de produção estáveis; • Simplicidade e Gestão Visual;

	<ul style="list-style-type: none"> • Fiabilidade do sistema produtivo e dos seus produtos.
Gestão Ágil	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidade e adaptabilidade perante a mudança; • Mínimo de trabalho; • Mitigação dos riscos de desenvolvimento de projeto; • Rápida reação; • Capacitação das equipas de trabalhos; • Fornecer valor antecipado ao cliente.
Gestão Colaborativa	<ul style="list-style-type: none"> • Co-inovação, co-aprendizagem e cocriação de valor; • Redução de custos e riscos; • Resolução rápida de desafios; • Flexibilidade e agilidade; • Crescimento coletivo; • Baixos investimentos; • Descentralização e produção distribuída; • Desenvolvimento individual da organização e colaboradores.
Gestão em Tempo Real	<ul style="list-style-type: none"> • Tomada rápida de decisões; • Detecção antecipada de irregularidades; • Previsões baseadas em dados reais para apoio de tomadas de decisão; • Aumento da fiabilidade do produto, derivado da natureza preditiva do sistema; • Mitigação de riscos e custos; • Sincronização de operações com a procura em tempo real; • <i>Smart optimization.</i>

Como é possível verificar existem vários benefícios consoante os diferentes paradigmas de gestão, desde conceitos mais reativos a sistemas mais regulares. O próximo capítulo trata-se do processo de integração dos paradigmas de gestão no quadro da I4.0. O *framework* da I4.0 exige a superação de uma série de desafios. Embora esta integração seja necessária para concretizar

plenamente a promessa da transformação digital e do *smart manufacturing*, há uma série de obstáculos a ultrapassar.

3.2. Dificuldades e Obstáculos relacionados com a Integração, no Âmbito da I4.0 dos Paradigmas de Gestão

A integração de paradigmas de gestão no quadro da I4.0 apresenta vários desafios e obstáculos, mas tem um enorme potencial para melhorar as operações industriais. Para ultrapassar estes obstáculos é necessária uma estratégia calculada que combine inovação tecnológica, segurança, gestão eficiente da mudança e uma avaliação cuidadosa dos efeitos económicos.

A I4.0 exige muitas modificações nos paradigmas de gestão tradicionais. Estas incluem a redefinição de funções, processos e KPIs e a utilização de dados em tempo real, IoT e IA. O obstáculo adicional da resistência cultural apresenta às organizações a necessidade de mudanças de mentalidade e a aplicação de técnicas bem-sucedidas de gestão da mudança. A integração é muito mais difícil devido a problemas de interoperabilidade, que exigem grandes despesas em novas tecnologias. Devido à ampla ligação e ao intercâmbio de dados da I4.0, a segurança é uma preocupação importante que exige medidas fortes para proteger os dados sensíveis. Além disso, é imperativo avaliar as consequências financeiras, que incluem despesas iniciais significativas, a fim de determinar se as vantagens potenciais compensam os custos.

A literatura enumera uma variedade de dificuldades e obstáculos, relativamente à adoção da I4.0, divididos maioritariamente em seis grupos [195]:

1. Económico/Financeiro: Remunerações económicas incertas, necessidades de investimento elevadas e escassez de financiamento;
2. Culturais: Para que a integração seja eficaz, deve ser estabelecida uma cultura que valorize a criatividade, o trabalho em equipa e o progresso contínuo;
3. Competências/Recursos: O conhecimento técnico insuficiente, a falta de pessoal experiente, a complexidade das aplicações da I4.0, tanto a nível técnico como prático e a necessidade de localizar parceiros de investigação adequados são algumas das deficiências.
4. Legal: Preocupações com a segurança dos dados (Cibersegurança), pois são necessárias medidas de segurança avançadas para garantir a integridade dos dados, a privacidade e a proteção contra ciberataques por isso, pode ser difícil navegar no ambiente regulamentar, especialmente quando as leis não são capazes de acompanhar o progresso rápido da tecnologia;
5. Técnica: A insuficiência de normas, a incerteza quanto à fiabilidade do sistema, a inadequação das infraestruturas informáticas, a dificuldade de compatibilidade e interoperabilidade e a imaturidade da tecnologia;
6. Processo de implementação: Implica a necessidade de novos modelos de negócio, a ausência de uma metodologia sistemática e um grau significativo de cooperação. Gerir

a transição sem problemas e sem prejudicar as atividades existentes é um problema crucial.

Sendo assim, as Tecnologias da Informação, as operações e a gestão são apenas algumas das disciplinas que devem trabalhar em conjunto para que a integração da I4.0 seja implementada com sucesso. Embora possa ser difícil, a cooperação multidisciplinar e o dismantelamento de barreiras organizacionais são necessários para uma integração abrangente. Através de uma combinação estratégica de abordagens técnicas, organizacionais e de recursos humanos, as empresas podem gerir eficazmente as complexidades da I4.0 e capitalizar plenamente a sua capacidade de estimular a inovação e aumentar a competitividade.

A I4.0 e o *Lean Management*, que se complementam pela procura da redução de desperdícios e na otimização de processos, poderão encontrar-se em conflito. A primeira barreira reside na base dos seus princípios. A literatura evidencia que a abordagem *Lean* se rege pela simplicidade e eficiência do sistema produtivo. Apela pela pouca variabilidade e padronização dos processos produtivos para a obtenção fluxos de produção mais estáveis. Contrariamente, a I4.0 tem como princípio a modularidade, de forma a conferir adaptabilidade e customização. Atingir níveis elevados de customização pode introduzir variabilidade, antagónico ao que a gestão *Lean* promove.

Também é comum caracterizar a metodologia *Lean* como uma ideologia de baixa tecnologia, para contribuir para um ambiente de simplicidade e claridade. Sendo assim, a implementação de ideologias e tecnologias da I4.0 pode levar a problemas de dificuldades de diferentes aspetos. Economicamente, podem ser necessárias grandes despesas financeiras para a adoção da tecnologia da I4.0, o que pode ser proibitivo para muitas empresas. As novas tecnologias e técnicas de trabalho da I4.0, também requerem a adaptação dos trabalhadores em consequência de um défice de competências devido a estas tecnologias requererem colaboradores especializados, o que constitui uma mudança cultural significativa em relação aos anteriores procedimentos *Lean*. Sendo assim, o balanceamento entre a tecnologia inovadora da I4.0 e o princípio de redução de desperdício da gestão *Lean* pode demonstrar um alto nível de complexidade indevido. Este facto pode exercer pressão sobre os recursos organizacionais e adiar a concretização dos benefícios da implementação das ideologias e tecnologias do paradigma da I4.0 [196].

Em suma, é necessário um planeamento estratégico, com formação aprofundada e ênfase na integração de novas tecnologias de forma a complementar e melhorar as abordagens *Lean*, fundamentais para uma integração harmoniosa de ambas as filosofias.

A integração das tecnologias e princípios da I4.0 com os atuais sistemas de Gestão Ágil pode apresentar desafios e necessitar de modificações significativas na infraestrutura de hardware e software. Os processos da Gestão Ágil poderão ter de ser reestruturados para poderem utilizar corretamente certas tecnologias da I4.0, tal como os robôs autónomos, a IoT e a análise baseada na IA. O volume e velocidade do tratamento dos dados recolhidos também pode ser uma dificuldade. Os sistemas convencionais de gestão de dados podem ficar sobrecarregadas com o enorme volume de dados produzidos pelos dispositivos e sensores IoT.

Devido à natureza intrínseca da Gestão Ágil para a tomada de decisões rápidas, o processamento e a análise rápida e precisa dos dados são essenciais.

Além disso, a ausência de normas específicas para a Gestão Ágil é uma das principais barreiras à implementação da I4.0 neste ambiente de produção. A I4.0 é afetada pela falta de soluções padronizadas, projetadas para satisfazer as exigências da Gestão Ágil, o que força o uso de soluções personalizadas com um custo elevado. Como tal, uma grande dificuldade é criar ou implementar soluções da I4.0 que sejam escaláveis, modulares e facilmente adaptáveis a uma variedade de processos de Gestão Ágil. A falta de standardização também pode levar a problemas de interoperabilidade, o que dificulta a integração de novos sistemas, a troca eficiente de dados, a escalabilidade das soluções e a inovação tecnológica [197].

Estes conhecimentos oferecem uma compreensão mais aprofundada dos desafios associados à integração da I4.0 na Gestão Ágil. Os obstáculos significativos incluem a complexidade da integração de tecnologia de ponta, o tratamento de um enorme volume de dados e a garantia de interoperabilidade. Para ultrapassar estes obstáculos, é necessária uma estratégia planeada e sistemática.

No geral, a I4.0 oferece vantagens consideráveis para vários paradigmas de gestão, inclusive a Gestão Colaborativa. Porém esta apresenta certas dificuldades e a superação destes obstáculos exige um planeamento cuidadoso, uma abordagem estratégica e a disponibilidade para fazer investimentos tanto em pessoas como em recursos tecnológicos. A adoção de mudanças em várias empresas ao mesmo tempo apresenta mais desafios do que a adoção de alterações dentro de uma empresa.

A nível tecnológico, garantir a interoperabilidade entre muitos parceiros dentro da rede colaborativa é um desafio significativo. Para tal, é necessário ultrapassar as disparidades nas plataformas, protocolos e normas utilizadas pelas diferentes empresas. A privacidade e a segurança dos dados são também questões muito importantes. O perigo de fuga de dados aumenta quando estes são partilhados entre várias empresas sendo assim necessária prudência relativamente à Cibersegurança. Além disso, uma colaboração eficaz exige o processamento e a partilha de dados em tempo real. Devido a esta realidade, torna-se complexo satisfazer a necessidade de todos os parceiros disporem das infraestruturas e das competências necessárias para tratar os dados em tempo real, o que exige investimentos significativos.

Economicamente, a existência de uma capacidade díspar de investimento entre os membros da rede de colaboração é um dos principais problemas. Consequentemente, algumas empresas podem ser capazes de investir em tecnologias da I4.0 com uma capacidade financeira mais elevada do que outras. Para as empresas financeiramente mais debilitadas pertencentes à rede de colaboração, a garantia da igualdade de participação e acesso a estas tecnologias pode ser particularmente complicada.

A implementação da I4.0 na Gestão Colaborativa também evidencia a importância das relações entre homem-máquina, especificamente. Isto implica garantir que as circunstâncias de trabalho são seguras, bem como tratar de outras questões e limitações que exigem mais investigação e atenção concentrada [11].

Ao enfrentar estes obstáculos em específico, as organizações podem gerir com sucesso as complexidades da adoção da I4.0 em redes colaborativas e concretizar todo o potencial do ecossistema industrial digitalizado e em rede.

Apesar de teoricamente existir uma forte correlação da I4.0 com a Gestão em Tempo Real, devido aos Sistemas em Tempo Real possuírem tecnologias que na grande maioria se encontram associadas à I4.0, este também apresenta dificuldades e obstáculos em relação à sua implementação. A escalabilidade dos Sistemas em Tempo Real associado da I4.0 torna-se difícil manter as capacidades de processamento em tempo real quando há mais dispositivos sensores ligados e pontos de dados. Os sistemas têm de ser construídos tendo em mente um escalonamento eficiente, o que exige frequentemente métodos sofisticados de equilíbrio de carga e arquiteturas de computação distribuído, o que leva a um grande investimento financeiro.

Além disso, a sobrecarga de dados apresenta ser também um problema relevante deste paradigma. Sensores, máquinas e outros dispositivos da I4.0 produzem enormes volumes de dados, especialmente quando associados a Sistemas em Tempo Real. Sendo assim, gerir e interpretar o grande volume de dados em tempo real para extrair informações úteis é complexo. A quantidade e a velocidade dos dados podem ser demasiado elevadas e exige computação de ponta e análises avançadas e rigorosas.

Problemas de interoperabilidade são frequentemente comuns. Integrar várias tecnologias da I4.0 com diferentes sistemas e tecnologias da Gestão em Tempo Real pode se apresentar como um desafio. É necessário ultrapassar os problemas de compatibilidade entre diferentes sistemas e criar protocolos estabelecidos para garantir que vários equipamentos e dispositivos possam interagir e funcionar em conjunto sem problemas [69].

Desta forma, as organizações devem adotar uma abordagem estratégica que atribua uma elevada prioridade ao investimento em infraestruturas escaláveis e fiáveis, tratamento de dados e garantir integração harmoniosa das novas tecnologias, de modo a utilizar com êxito a I4.0 para a Gestão em Tempo Real.

Na Tabela 6 encontra-se sintetizado as ideias principias referidas neste para cada paradigma aludido.

Tabela 6 - Dificuldades e Obstáculos relacionados com a Integração, no Âmbito da I4.0 dos Paradigmas de Gestão

Paradigmas de Gestão	Dificuldades e Obstáculos
Gestão Lean	<ul style="list-style-type: none"> • Conflito de ideais (introdução de variabilidade num sistema padronizado); • Altos investimentos financeiros; • Mudança cultural significativa; • Adaptação dos colaboradores.
Gestão Ágil	<ul style="list-style-type: none"> • Reestruturação dos processos ágeis;

	<ul style="list-style-type: none">• Volume e velocidade de tratamento de dados para tomada rápida de decisões;• Ausência de normas específicas para a implementação da I4.0.
Gestão Colaborativa	<ul style="list-style-type: none">• Interoperabilidade dentro da rede colaborativa;• Preocupação pela segurança e privacidade de dados acrescida;• Diferenças na capacidade de investimento na transição para o paradigma da I4.0 dentro da rede colaborativa;• Atenção concentrada nas relações homem-máquina.
Gestão em Tempo Real	<ul style="list-style-type: none">• Escalabilidade dos sistemas devido a grandes investimentos financeiros;• Sobrecarga de dados;• Interoperabilidade, devido à integração de várias tecnologias.

Assim, a integração bem-sucedida e o sucesso a longo prazo da I4.0 nos diferentes paradigmas de gestão dependerá da resposta a estes desafios com planeamento estratégico, investimento no desenvolvimento de talentos e uma dedicação à melhoria contínua.

4. Metodologia RSL

A presente revisão da literatura procura representar o estado atual do conhecimento sobre o tópico abordado nesta dissertação e irá ser apoiada por uma abordagem sistemática que facilita a identificação do conteúdo conceitual do tópico e avança o desenvolvimento da teoria.

Nesta dissertação irá ser usada uma metodologia SLR dividida em seis etapas totais e baseada no trabalho desenvolvido por Leonilde Varela, Goran Putnik e Fernando Romero. Foi selecionado este *framework*, pois a estrutura desta abordagem permite colmatar as falhas entre as metodologias existentes, foi utilizada dentro da área de investigação, nomeadamente produção e gestão e vai permitir uma investigação rigorosa da literatura, o que reforça a validade e a fiabilidade dos resultados obtidos através desta abordagem. Assim é assegurado que cada fase do processo de revisão é realizada de forma rigorosa e transparente ao evitar desvios, o que permite a repetibilidade dos resultados.

Para prosseguir com a seguinte abordagem SLR, devem ser executadas as seguintes ações [11]:

1. Organizar e elaborar a questão de pesquisa: Definir claramente as questões de investigação que orientarão o exame exaustivo da literatura. Isto implica determinar as ideias principais, os parâmetros e os objetivos do estudo;
2. Localização e pesquisa da literatura: Efetuar uma pesquisa exaustiva da literatura para encontrar trabalhos pertinentes. Isto implica a seleção de bases de dados pertinentes, a utilização de termos de pesquisa e frases de consulta pertinentes;
3. Recolha de dados e avaliação da qualidade: Compilar informações dos estudos selecionados e avaliar o seu calibre. Isto implica a recolha de dados pertinentes e a avaliação da autoridade e fiabilidade das fontes, bem como a definição e aplicação dos critérios de inclusão e exclusão;
4. Seleção e avaliação das contribuições: Fazer uma lista dos estudos mais relevantes para abordar as questões de investigação. Esta fase envolve a avaliação dos estudos selecionados;
5. Síntese e análise de dados: Combinar as conclusões da investigação selecionada. Isto implica a compilação da informação, a deteção de tendências e a formulação de juízos com base no conjunto de provas;

6. Apresentação e interpretação dos resultados: Apresentar de forma clara e sistemática os dados combinados. Isto implica analisar as implicações, avaliar os dados à luz das questões de investigação e oferecer sugestões para um estudo mais aprofundado.

Estes procedimentos garantem uma abordagem metódica e exaustiva da revisão da literatura, o que acaba por resultar numa compreensão profunda da questão de investigação. A Figura 9 apresenta descreve de forma sintética o método SLR usado.

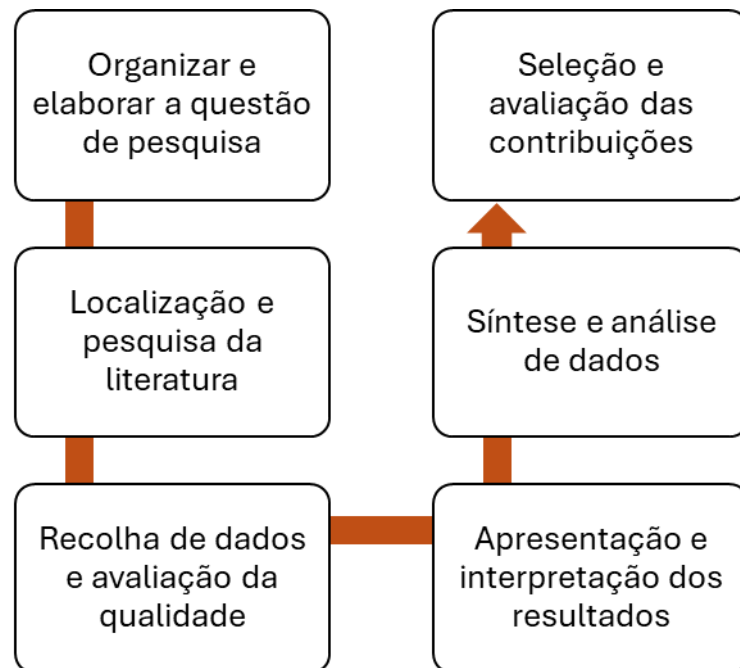


Figura 9 - Fluxograma Metodologia RSL

4.1. Organizar e elaborar a questão de pesquisa

Aqui será definido o âmbito do processo de revisão sistemática da literatura. Como enfatizado ao longo da dissertação, a I4.0 está a tornar-se cada vez mais popular, sublinhando a importância do estudo e investigação de conceitos relacionados com os vários paradigmas de gestão no âmbito industrial. Adicionalmente, existe a necessidade de um estudo que inclua todos os paradigmas de gestão associados à I4.0, uma vez que na base de dados utilizada, não existe um estudo que compile todos estes conceitos.

Como resultado, o principal objetivo deste trabalho é comparar diferentes estratégias de gestão da produção utilizando o quadro da I4.0. Procura-se compreender e sintetizar o conhecimento atual no seu todo, com ênfase nas ligações entre os muitos componentes que constituem esta disciplina. Ao facilitar o aprofundamento de vários paradigmas de gestão, esta análise espera melhorar os processos de tomada de decisões de gestão integrada. Para além disso, o estudo pretende cumprir os objetivos específicos de investigação, avaliando as sinergias entre os paradigmas de gestão enunciados e a I4.0, contribuindo assim para futuros caminhos de investigação.

4.2. Localização e pesquisa da literatura

A localização e pesquisa da literatura vai ser dividida em várias partes, nomeadamente: seleção da base de dados adequada, definição dos grupos das palavras-chave de pesquisa e definição da *search query*.

4.2.1. Base de Dados

Primeiramente, a Web of Science (WoS) foi a base de dados utilizada devido à sua reputação de hospedar artigos de alta qualidade, amplo acesso a material científico. É uma base de dados interdisciplinar, que inclui todo o tipo de publicações nomeadamente livros, actas de conferências, revistas internacionais avaliadas pelos pares e outras publicações académicas. Possui publicações de editoras de renome como a Springer, Elsevier, Taylor & Francis, John Wiley and Sons, IEEE e MDPI. Estas editoras são amplamente reconhecidas pelas suas contribuições para uma variedade de áreas científicas e oferecem acesso a uma vasta gama de revistas de elevada qualidade, incluindo alternativas de acesso livre. Isto garantiu uma seleção completa e representativa das fontes para o estudo desenvolvido.

Apenas foram consideradas publicações científicas internacionais, com texto integral, revistas por pares, incluindo apenas artigos de revistas e escritos em inglês. A pesquisa foi efetuada até ao final do ano 2023 com o objetivo de recolher artigos o mais relevante possível. Sendo assim a pesquisa foi feita de 2010 a final de 2023. Foi considerado apenas do ano 2010 ou posterior, visto que foi por volta dessa época que a expressão “Indústria 4.0” começou a ser amplamente utilizada e a espalhar-se entre os investigadores da área [11].

4.2.2. Palavras-Chave

Seguidamente, definiu-se as principais palavras-chave e foram organizadas em dois grandes grupos designados por Palavras-Chave Grupo 1 (PCG1) e Palavras-Chave Grupo 2 (PCG2). O primeiro grupo designado por PCG1, envolve todas as denominações mais importantes do termo “Indústria 4.0”. Também compreende uma lista dos pilares ou conceitos mais importantes da I4.0, bem como das tecnologias subjacentes que são considerados pertinentes para os objetivos da investigação. O segundo grupo PCG2, inclui as designações mais comuns referentes aos paradigmas de gestão abordados, bem como termos mais frequentemente utilizados dentro da contextualização do tema. Provêm maioritariamente da revisão bibliográfica e análise bibliométrica feita. Palavras como “*Agility*” e “*Collaboration*” foram descartadas devido a aumentarem demasiado o número de publicações (para as dezenas de milhares), perdendo a especificidade da pesquisa. O mesmo acontecia com a utilização dos termos das tecnologias da I4.0 como “*Big Data*” e “*IoT*”. O número de resultados encontrados era muito elevado e incluíam artigos que não se enquadravam com o objetivo da dissertação.

A Tabela 1Tabela 7 resume o processo de identificação e agrupamento das principais palavras-chave em duas categorias principais dos termos de pesquisa primários examinados: PCG1 e PCG2.

Tabela 7 - Grupos das Palavras-Chave

PCG1	PCG2
<u>Indústria 4.0</u>	<u>Paradigmas de Gestão</u>
	Lean Management
Industry 4.0	Lean Manufacturing
I4.0	Lean Thinking
Fourth Industrial Revolution	Agile Management
Interoperability	Agile Manufacturing
Decentralization	Agile
Virtualization	Collaborative Management
Servitization	Collaborative Manufacturing
Real-Time Capability	Collaborative Networks
Modularity	Real-Time Management
Eco Desing	Real-Time Manufacturing
	Real-Time Systems

4.2.3. Search Query

Finalmente, foi criada uma *search query*, que junta os dois grupos de palavras-chave utilizando o operador lógico “AND” e processasse os termos individuais dentro de cada grupo utilizando o operador “OR” para efetuar a pesquisa de literatura. Estes operadores lógicos permitem contextualizar esta questão no cenário da I4.0 e impor um enfoque na investigação pretendida da ligação entre vários tipos de paradigmas de gestão utilizados nas organizações/indústria, relativamente a desafios de produção e gestão. Assim garante-se, que o grupo da I4.0 é integrado no grupo dos paradigmas de gestão. A *search query* resultante das palavras-chave é a seguinte: (“Industry 4.0” OR “I4.0” OR “Fourth Industrial Revolution” OR “Interoperability” OR “Decentralization” OR “Virtualization” OR “Servitization” OR “Real-Time Capability” OR “Modularity” OR “Eco Desing”) AND ((“Lean Management” OR “Lean Manufacturing” OR “Lean Thinking”) OR (“Agile Management” OR “Agile Manufacturing” OR “Agile”) OR (“Collaborative Management” OR “Collaborative Manufacturing” OR “Collaborative Networks”) OR (“Real-Time Management” OR “Real-Time Manufacturing” OR “Real-Time Systems”)). A utilização desta estratégia de pesquisa produziu um total de 866 artigos como fontes, com as restrições anteriormente referidas.

4.3. Recolha de dados e avaliação da qualidade

A recolha de dados e avaliação da qualidade consiste em reunir as informações dos estudos selecionados e avaliar a sua qualidade. Isto implica a recolha de dados relevantes e a avaliação da autoridade e fiabilidade das fontes. Avaliar a autoridade e a fiabilidade implica aferir a credibilidade de cada fonte, considerando fatores como a reputação dos autores e a qualidade da publicação. Além disso, definiu-se e aplicou-se critérios de inclusão e exclusão para garantir a qualidade e a pertinência dos estudos selecionados. Estes critérios garantem que apenas as publicações que cumprem normas são considerados e assim manter a qualidade geral e a relevância da investigação.

Uma avaliação inicial da qualidade de toda a lista de 866 artigos recolhidos nas bases de dados *Web of Science* serviu de base para um procedimento geral de seleção e análise das publicações. Foram então efetuadas duas sub-análises:

1. Definição dos critérios de exclusão: Os artigos que não satisfizeram os requisitos fundamentais de qualidade ou relevância não foram incluídos;
2. Definição dos critérios de inclusão: Foram aceites os trabalhos que satisfaziam determinados padrões de qualidade e pertinência e que estavam de acordo com o âmbito da investigação;

Assim, utilizando os critérios de relevância para o foco do estudo, foi encontrado um subconjunto dos trabalhos mais importantes.

4.3.1. Critérios de Exclusão

Primeiramente, foram definidos critérios de exclusão para o grupo inicial de artigos recolhidos, a fim de melhor sintetizar os principais resultados deste estudo. Ao recorrer a esta técnica de eliminação, a amostra inicial de artigos é reduzida substancialmente para posterior investigação adicional.

Por conseguinte, foram desclassificadas todas as publicações sem texto integral disponível, as que não foram revistas por pares, as que não foram escritas em inglês e as que não foram publicadas em revistas internacionais. Foram também excluídas as publicações que não pertencessem a editoras de renome, como a Springer, Elsevier, Taylor & Francis, John Wiley & Sons, IEEE ou MDPI, ou revistas científicas mundiais. Além disso, não foram consideradas publicações não relacionadas com o domínio da engenharia, produção, fabrico ou gestão, tais como as centradas nos cuidados de saúde. Supletivamente foram excluídas publicações sem relação entre a Indústria 4.0 e os paradigmas de gestão abordados.

4.3.2. Critérios de Inclusão

Para a definição dos critérios de inclusão do subconjunto de artigos a compreender na lista dos mais significativos para posterior classificação e análise teve-se em conta diferentes aspetos, nomeadamente:

- Cada publicação deve conter pelo menos duas palavras-chave pertencentes a cada grupo, ou seja, no mínimo uma palavra-chave do grupo da I4.0 e outra palavra-chave do grupo das diferentes abordagens de gestão, exceto se o *abstract* se alinhar especificamente com o objetivo da RSL;
- É tido em consideração se são mencionadas técnicas e métodos dos paradigmas de gestão relacionados com algum aspeto da I4.0, no domínio da produção e gestão, a fim de satisfazer os pré-requisitos para os objetivos principais de investigação;
- Para um escrutínio mais exigente foi necessário que os artigos pertencessem apenas ao domínio da produção, fabrico e gestão. Não foi incluído o tópico “engenharia” por ser bastante abrangente (ex: Engenharia Química, *Computer Sciences*);
- Adicionalmente, se algum tipo de integração ou prática de integração é mencionado no contexto da investigação.

Assim, procurou-se incluir apenas artigos que se enquadrassem plenamente no objetivo da investigação e que, por isso, fossem relevantes. Filtrou-se os resumos, palavras-chave e títulos, bem como as suas fontes. Assim, era essencial que os artigos se centrassem, pelo menos em certa medida, nas características dos paradigmas de gestão abordados. Também era necessário que abordassem aspetos nos domínios científicos da produção e/ou da gestão, bem como que discutissem alguma componente da I4.0.

O subconjunto de publicações resultantes foi de 164, consideradas as mais importantes, uma vez que se enquadravam mais estritamente no domínio da investigação efetuada. Estes passos foram auxiliados através do software Rayyan.

4.4. Seleção e avaliação das contribuições

Os artigos mais pertinentes foram selecionados para análise e discussão adicionais, com base na adequação do seu conteúdo ao tema do estudo.

Para determinar quais os artigos no domínio visado são os mais relevantes, foi feita uma nova análise desta coleção de artigos obtida anteriormente. Através desta pesquisa, confirmou-se que as publicações incluíam efetivamente conceitos ligados à I4.0 e aos paradigmas de gestão mencionados no corpo do texto, em vez de apenas os referirem brevemente no título, no resumo ou nas palavras-chave. Recorreu-se ao software Rayyan para automatizar o processo, de forma que se obtivesse os melhores resultados.

Também, se teve em consideração o número de citações dos artigos sendo apenas selecionados artigos que garantissem a maior qualidade e melhor fiabilidade da informação a ser analisada.

Assim, foi elaborada uma lista final de 49 artigos através da aplicação de todo o procedimento de seleção, baseado nos critérios de inclusão e exclusão, e do refinamento da análise para encontrar as publicações mais pertinentes. Posteriormente, foi efetuada uma análise mais aprofundada desta lista final, com ênfase no âmbito da pesquisa e na sua importância na I4.0 associada dos paradigmas de gestão. Os resultados desta análise encontram-se nos próximos subpontos.

4.5. Síntese e análise de dados

O capítulo seguinte, que trata da integração dos resultados dos estudos selecionados, exige a síntese da informação, a análise das tendências e a tomada de decisões bem informadas com base no vasto conjunto de dados disponíveis.

A Tabela 8 inclui a categorização dos artigos de cada área de investigação relativos às técnicas de gestão e os nomes das publicações. A tabela inclui ainda os contributos principais de todos os artigos relevantes para o âmbito da dissertação encontrados.

Tabela 8 - Resultados da RSL e principais contribuições

Autores	Título	Área de investigação	Contribuições
[198]	<i>A comparison on Industry 4.0 and Lean Production between manufacturers from emerging and developed economies</i>	Gestão <i>Lean</i>	Destaca os diferentes níveis de integração e os desafios da I4.0 e da Gestão <i>Lean</i> em diferentes contextos económicos e sublinha a necessidade de estratégias adaptadas.
[199]	<i>Assessment by Lean Modified Manufacturing Maturity Model for Industry 4.0: A Case Study of Pakistan's Manufacturing Sector</i>	Gestão <i>Lean</i>	Avalia a preparação e a maturidade das empresas paquistanesas do sector transformador para a Indústria 4.0 e identifica lacunas críticas e áreas de melhoria.
[200]	<i>Bundles of Lean Automation practices and principles and their impact on operational performance</i>	Gestão <i>Lean</i>	Valida empiricamente o conjuntos de práticas de automatização <i>Lean</i> e demonstra o seu impacto positivo no desempenho operacional quando integradas nas tecnologias da I4.0.
[201]	<i>Deploying Convolutional Neural Network to Reduce Waste in Production System</i>	Gestão <i>Lean</i>	Apresenta um modelo que utiliza tecnologias da I4.0 para automatizar a deteção de defeitos e reduzir significativamente o desperdício e melhorar a eficiência da produção.

[202]	<i>Evaluation of the Relation between Lean Manufacturing, Industry 4.0, and Sustainability</i>	Gestão <i>Lean</i>	Investiga a forma como a integração da manufatura <i>Lean</i> com as tecnologias da Indústria 4.0 melhora as práticas e o desempenho em matéria de sustentabilidade.
[203]	<i>Identifying pathways to a high-performing lean automation implementation: An empirical study in the manufacturing industry</i>	Gestão <i>Lean</i>	Fornecer informações sobre as sequências de implementação das tecnologias <i>Lean</i> e I4.0 e identifica os principais fatores para alcançar um elevado desempenho.
[204]	<i>Impact of Industry 4.0 and circular economy on lean culture and leadership: Assessing digital green lean as a new concept</i>	Gestão <i>Lean</i>	Explora os efeitos sinérgicos da I4.0 e dos princípios da economia circular na cultura <i>Lean</i> e propõe um quadro <i>green Lean</i> para um melhor desempenho organizacional.
[205]	<i>Impact of industry 4.0 technologies on lean manufacturing and organizational performance in an organization</i>	Gestão <i>Lean</i>	Mostra empiricamente a correlação positiva entre a adoção da I4.0 e as melhorias no <i>Lean</i> e no desempenho organizacional.
[206]	<i>Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean management tools: a bibliometric analysis</i>	Gestão <i>Lean</i> e em Tempo Real	Analisa a literatura para identificar a forma como as tecnologias da I4.0 melhoram as ferramentas de gestão <i>Lean</i> e fornece uma panorâmica bibliométrica abrangente.
[207]	<i>Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies</i>	Gestão <i>Lean</i>	Examina a implementação simultânea da manufatura <i>Lean</i> e da I4.0 em empresas brasileiras e mostra melhorias significativas no desempenho operacional.
[15]	<i>Industry 4.0 and lean management a proposed integration model and research propositions</i>	Gestão <i>Lean</i>	Propõe um modelo que integra a Gestão <i>Lean</i> com as tecnologias da I4.0 e destaca potenciais áreas de investigação para otimizar a

			eficiência operacional e a inovação.
[208]	<i>Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies</i>	Gestão Lean	Examina a integração das práticas <i>Lean</i> e da I4.0 nas empresas indianas e demonstra melhorias significativas na sustentabilidade e no desempenho operacional.
[185]	<i>Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing</i>	Gestão Lean	Discute a forma como as tecnologias da I4.0 atuam como facilitadores do <i>Lean</i> e melhoram a automação, a análise de dados e a otimização de processos.
[209]	<i>Lean 4.0 implementation framework Proposition using a multi-method research approach</i>	Gestão Lean	Introduz um quadro de implementação <i>Lean</i> 4.0 que combina os princípios <i>Lean</i> com as tecnologias da I4.0 e oferece uma abordagem estruturada para melhorar a eficiência e a adaptabilidade da produção.
[210]	<i>The complementary effect of lean manufacturing and digitalisation on operational performance</i>	Gestão Lean	Explora a forma como a sinergia entre o <i>Lean</i> e as tecnologias digitais melhora o desempenho operacional, a flexibilidade e a competitividade.
[189]	<i>The link between Industry 4.0 and lean manufacturing mapping current research and establishing a research agenda</i>	Gestão Lean	Mapeia o panorama atual da investigação na intersecção da I4.0 e do <i>Lean</i> e propõe uma agenda de investigação futura para abordar as lacunas e os desafios existentes.
[29]	<i>Towards a lean automation interface for workstations</i>	Gestão Lean	Apresenta o desenvolvimento de uma interface de comunicação unificada para a digitalização dos métodos <i>Lean</i> e utiliza sistemas ciber-

			físicos, para melhorar a modularidade e a flexibilidade da produção.
[211]	<i>An Agile System to Enhance Productivity through a Modified Value Stream Mapping Approach in Industry 4.0 A Novel Approach</i>	Gestão <i>Lean</i> e Ágil	Propõe uma metodologia modificada de mapeamento do fluxo de valor através da I4.0, para manter e aumentar a produtividade através da eliminação de atividades sem valor acrescentado no chão de fábrica.
[33]	<i>Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.0 technologies an integrative approach</i>	Gestão <i>Lean</i> e Ágil	Fornece um quadro conceitual que demonstra como as tecnologias da I4.0 integram o <i>Lean</i> e <i>Agile</i> para melhorar a eficiência e a flexibilidade dos custos.
[212]	<i>Implications of using Industry 4.0 base technologies for lean and agile supply chains and performance</i>	Gestão <i>Lean</i> e Ágil	Explora o impacto das tecnologias base da I4.0 nas estratégias das cadeias de abastecimento <i>Lean</i> e ágeis e os seus efeitos no desempenho operacional.
[213]	<i>Manufacturing practices and servitization: The role of mass customization and product innovation capabilities</i>	Gestão <i>Lean</i> e Ágil	Discute a forma como as práticas de produção e as capacidades de personalização em massa e de inovação de produtos facilitam a servitização em ambientes da I4.0.
[214]	<i>Modelling the relationship of digital technologies with lean and agile strategies</i>	Gestão <i>Lean</i> e Ágil	Apresenta um modelo que utiliza a modelação estrutural interpretativa para mostrar como as várias tecnologias da I4.0 podem permitir e apoiar estratégias <i>Lean</i> e ágeis ao realçar as relações hierárquicas entre elas.
[197]	<i>Adapting an agile manufacturing concept to</i>	Gestão Ágil	Explora a adaptação dos princípios ágeis no âmbito da

	<i>the reference architecture model industry 4.0 A survey and case study</i>		I4.0 e demonstra aplicações práticas e benefícios através de estudos de caso.
[215]	<i>Agile manufacturing practices the role of big data and business analytics with multiple case studies</i>	Gestão Ágil	Destaca a importância dos grandes volumes de dados e no reforço das práticas de ágeis e demonstra um melhor desempenho competitivo e empresarial através da I4.0.
[216]	<i>Agile supply chain management based on critical success factors and most ideal risk reduction strategy in the era of industry 4.0 application to plastic industry</i>	Gestão Ágil	Identifica os principais fatores de sucesso e as estratégias de redução dos riscos para uma Gestão Ágil da cadeia de abastecimento, destacando o papel das tecnologias da Indústria 4.0.
[217]	<i>Axiomatic design guidelines for the design of flexible and agile manufacturing and assembly systems for SMEs</i>	Gestão Ágil	Propõe orientações de concepção e utiliza a abordagem de concepção axiomática para ajudar as PME a desenvolver sistemas de produção flexíveis e ágeis adequados à I4.0.
[218]	<i>Role of Industry 4.0 in agile manufacturing to achieve sustainable development</i>	Gestão Ágil	Examina a forma como as tecnologias da I4.0 podem apoiar práticas ágeis e contribui para o desenvolvimento sustentável.
[186]	<i>The link between information and digital technologies of industry 4.0 and agile supply chain Mapping current research and establishing new research avenues</i>	Gestão Ágil	Analisa a investigação atual sobre a integração das tecnologias digitais da I4.0 com cadeias de abastecimento ágeis e propõe novas direções de investigação para aumentar a agilidade.
[193]	<i>Collaborative service-component integration in cloud manufacturing</i>	Gestão Ágil e Colaborativa	Desenvolve um <i>framework</i> para a integração dinâmica de serviços e componentes de <i>Collaborative Networks</i> e

			como melhora a agilidade e a modularização na I4.0
[219]	<i>Transformational shifts through digital servitization</i>	Gestão Ágil e Colaborativa	Examina a forma como a servitização digital impulsiona mudanças transformacionais na indústria através da integração de tecnologias digitais e de modelos empresariais orientados para os serviços.
[220]	<i>A next-generation IoT-based collaborative framework for electronics assembly</i>	Gestão Colaborativa	Desenvolve uma estrutura de sistema ciber-físico baseada na IoT, integrando ambientes de simulação para melhorar a colaboração e a agilidade.
[221]	<i>Collaborative approaches in sustainable and resilient manufacturing</i>	Gestão Colaborativa	Explora estratégias colaborativas para alcançar a sustentabilidade e a resiliência na indústria transformadora e destaca a integração das tecnologias da I4.0 para melhorar a eficiência operacional e a adaptabilidade.
[222]	<i>Communication method for manufacturing services in a cyber-physical manufacturing cloud</i>	Gestão Colaborativa	Propõe um novo método de comunicação para melhorar a integração e a interoperabilidade dos serviços num ambiente de nuvem ciber-físico. Facilita o intercâmbio e a coordenação de dados sem descontinuidades, potencializando a colaboração.
[223]	<i>Design of a Global Decision Support System for a manufacturing SME Towards participating in</i>	Gestão Colaborativa	Introduz um quadro global de sistemas de apoio à decisão para as PME e tira partido das tecnologias da I4.0 para permitir uma participação

	<i>Collaborative Manufacturing</i>		efetiva em Collaborative Networks.
[224]	<i>Reference framework for enhanced interoperable collaborative networks in industrial organisations</i>	Gestão Colaborativa	Apresenta um quadro de referência para melhorar a interoperabilidade e a colaboração entre organizações industriais e centra-se no papel da I4.0 na melhoria dos sistemas em rede.
[225]	<i>Security and safety assurance of collaborative manufacturing in industry 4.0</i>	Gestão Colaborativa	Investiga os desafios de segurança e proteção em ambientes de produção colaborativo e propõe soluções para garantir operações seguras e protegidas em ambientes da I4.0.
[226]	<i>Semantic communications between distributed cyber-physical systems towards collaborative automation for smart manufacturing</i>	Gestão Colaborativa	Explora técnicas de comunicação semântica para melhorar a colaboração entre sistemas ciber-físicos distribuídos e promove processos de produção mais inteligentes e mais automatizados.
[227]	<i>Sustained value creation driven by digital connectivity: A multiple case study in the mechanical components industry</i>	Gestão Colaborativa	Examina a forma como a conectividade digital e as tecnologias da I4.0 impulsionam a criação de valor sustentado na indústria de componentes mecânicos e destaca estudos de caso de implementações bem-sucedidas.
[228]	<i>An Internet of Things (IoT)-based collaborative framework for advanced manufacturing</i>	Gestão Colaborativa e em Tempo Real	Propõe um quadro geral baseado na IoT para a Gestão Colaborativa, através de ênfase nas interações ciber-físicas e à computação em nuvem para melhorar a

			eficiência e a integração na produção avançada.
[229]	<i>A Data Governance Framework for Industry 4.0</i>	Gestão em Tempo Real	Desenvolve um <i>framework</i> para uma governação eficaz dos dados na I4.0 e centra-se na garantia da qualidade, segurança e conformidade dos dados para otimizar os processos industriais em tempo real.
[230]	<i>A Global Manufacturing Big Data Ecosystem for Fault Detection in Predictive Maintenance</i>	Gestão em Tempo Real	Propõe um ecossistema de grandes volumes de dados para a deteção de falhas na manutenção preditiva, aumentando a fiabilidade e a eficiência na indústria transformadora através da análise avançada de dados.
[231]	<i>An Empirical Investigation of the Influence of Industry 4.0 Technology Capabilities on Agriculture Supply Chain Integration and Sustainable Performance</i>	Gestão em Tempo Real	Analisa a forma como as tecnologias da I4.0 melhoram a integração da cadeia de abastecimento e o desempenho sustentável e destaca as principais capacidades tecnológicas.
[232]	<i>An Entropy-Based Approach to Real-Time Information Extraction for Industry 4.0</i>	Gestão em Tempo Real	Apresenta um método baseado na entropia para extração de informações em tempo real para melhorar a tomada de decisões e a eficiência operacional em ambientes da I4.0.
[233]	<i>Evaluating Docker for Lightweight Virtualization of Distributed and Time-Sensitive Applications in Industrial Automation</i>	Gestão em Tempo Real	Avalia a utilização da virtualização leve na automação industrial, demonstra os seus benefícios para a gestão de aplicações distribuídas e sensíveis ao tempo.

[234]	<i>Industrial IoT and Long Short-Term Memory Network-Enabled Genetic Indoor-Tracking for Factory Logistics</i>	Gestão em Tempo Real	Combina a IoT com redes neurais avançadas para uma monitorização da linha de produção e melhora a logística da fábrica e a eficiência operacional.
[235]	<i>Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things</i>	Gestão em Tempo Real	Apresenta um quadro para a captura e integração de informações em tempo real na produção, através da IoT para melhorar a tomada de decisões e o controlo operacional em tempo real.
[236]	<i>Strategic Key Elements in Big Data Analytics as Driving Forces of IoT Manufacturing Value Creation A Challenge for Research Framework</i>	Gestão em Tempo Real	Identifica elementos estratégicos da análise de grandes volumes de dados que impulsionam a criação de valor na produção de IoT e propõe um quadro de investigação para enfrentar os desafios.
[237]	<i>Time-slotted software-defined Industrial Ethernet for real-time Quality of Service in Industry 4.0</i>	Gestão em Tempo Real	Desenvolve uma abordagem Ethernet definida por software com intervalos de tempo para garantir a qualidade de serviço em tempo real em aplicações da I4.0.
[238]	<i>Digital enabled agility Industry 4.0 unlocking real-time information processing traceability and visibility to unleash the next extent of agility</i>	Gestão em Tempo Real e Ágil	Destaca a forma como a I4.0 reforça a agilidade digital ao melhorar o processamento de informações em tempo real, a rastreabilidade e a visibilidade e aumenta assim a eficiência e a capacidade de resposta da produção.

A análise de tendências e de informação geral é feita no início do Capítulo 5, no Subcapítulo 5.1 denominado de Análise de Tendências e Informação Geral.

4.6. Apresentação e interpretação dos resultados

O último passo da metodologia RSL encontra-se presente Capítulo 5 e trata-se de apresentar os dados combinados de uma forma compreensível e organizada. Isto implica avaliar os resultados em relação às questões de investigação, considerar as consequências e fazer recomendações para mais investigação. São feitos *clusters* da informação resultante da pesquisa realizada de forma a responder aos principais objetivos da dissertação. A identificação de Gaps da literatura, também irá ser tratada neste passo, bem como limitações na informação recolhida que podem afetar as conclusões retiradas.

Finalmente, são feitas sugestões para estudos futuros, tal como os caminhos que a investigação desta específica área deve tomar para que exista uma maior quantidade e clareza de informação disponível.

5. Resultados e Discussão

O presente capítulo trata dos resultados resultantes da RSL. Classifica os dados de acordo com as categorias ou tópicos associados às questões do estudo. Assim é realizada uma estrutura de informação coesa, que permite a compreensão de matérias complicadas, através da representação de dados como tabelas, gráficos e diagramas.

De seguida, considera-se as consequências dos dados. É refletido sobre as implicações que os resultados têm para o assunto em geral e como se relacionam com as questões de investigação. São avaliadas tendências, padrões ou anomalias que possam afetar os resultados do estudo.

Posteriormente, é feita uma análise profunda da informação recolhida com enfoque nos objetivos da dissertação, através de *clusters* e os gaps da literatura são identificados.

Assim este capítulo encontra-se dividido em Análise de Tendências e Informação Geral, Avaliação dos Paradigmas de Gestão no Contexto da I4.0, Tecnologias 4.0, Sinergia entre os Paradigmas de Gestão e a I4.0 e Gaps da Literatura.

5.1. Análise de Tendências e Informação Geral

A Análise de Tendências e Informação Geral foca-se nos dados generalizados dos resultados da RSL. São analisados gráficos relativos a dados estatísticos do grupo de artigos resultante da RSL e é feita uma análise global sobre os mesmos.

A Figura 10 representa a distribuição dos artigos ao longo dos anos. O gráfico ilustra a evolução do número de publicações sobre paradigmas de gestão abordados no contexto da I4.0 de 2010 a 2023, período analisado na RSL. O número extremamente baixo de publicações durante o período de 2010 a 2014, sugere que o conhecimento destes paradigmas no contexto da I4.0 ainda se estava a desenvolver ou não se encontrava bem estabelecido. No entanto, a partir de 2015, regista-se um aumento visível das publicações, o que indica um interesse crescente e uma compreensão do significado destas técnicas de gestão no cenário industrial em mudança. O número de artigos aumentou significativamente em 2018, o que pode ter sido causado por uma aceitação industrial destes paradigmas ou, por um avanço na compreensão, o que, por sua vez, despertou um maior interesse académico. Depois de atingir o seu máximo em 2018, o número de publicações diminuiu drasticamente em 2019, antes de registar um aumento irregular em 2020 e nos anos seguintes. Não obstante estas variações, verifica-se uma tendência geral de aumento entre 2020 e 2023, sendo 2023 o ano em que se regista o maior número de publicações. Este padrão aponta para um potencial ressurgimento do interesse ou um

progresso contínuo na área. Assim, o gráfico indica que, nos últimos dez anos, a comunidade acadêmica tem-se concentrado cada vez mais na implementação destes paradigmas de gestão no âmbito da I4.0, como se pode ver pelo aumento considerável de publicações nos últimos anos. Esta tendência está em linha com uma mudança mais ampla na indústria, em que as empresas estão a utilizar estes paradigmas para melhorar a tomada de decisões em tempo real, a eficiência e a flexibilidade, todos eles essenciais na era da I4.0. Verificou-se que o número de publicações apresenta altos e baixos. Estas alterações podem ser atribuídas a tendências de mercado, avanços técnicos ou aos ciclos de publicação de conferências e revistas importantes. Além disso, podem representar variações no esforço de investigação. O pico em 2023 pode indicar uma concentração de atividades de investigação ou novas descobertas que reacenderam a curiosidade sobre estes temas.

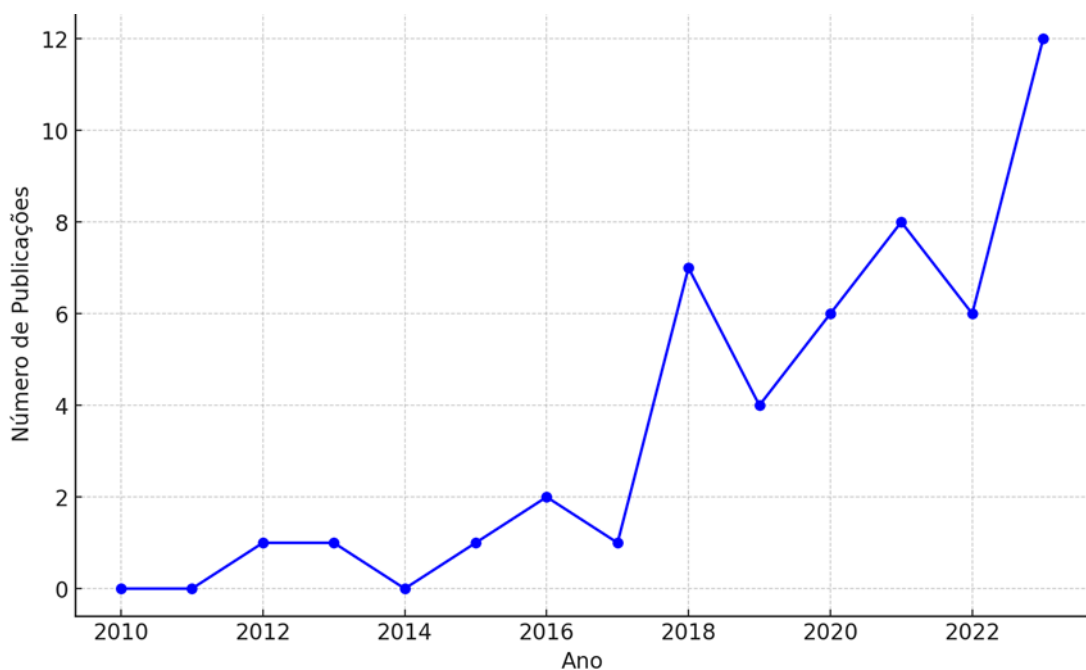


Figura 10 - Gráfico Publicações por Ano

Também é possível observar-se na Figura 11 os principais editores que contribuem para a respetiva área de investigação. De acordo com uma análise da distribuição das publicações pelos diferentes editores, a Elsevier e a Taylor & Francis são as duas principais editoras no domínio dos paradigmas de gestão da I4.0. As suas posições de destaque demonstram o seu profundo envolvimento e a cobertura exaustiva deste campo de estudo emergente. Embora o IEEE e a Springer Link também tenham dado contributos substanciais, o seu envolvimento é comparativamente menos significativo, o que os coloca a meio do espectro de impacto. O número comparativamente menor de publicações da MDPI e da Wiley pode ser o resultado de uma concentração mais acentuada nas outras editoras. A editora MDPI é uma editora mais recente, podendo influenciar também o número de resultados.

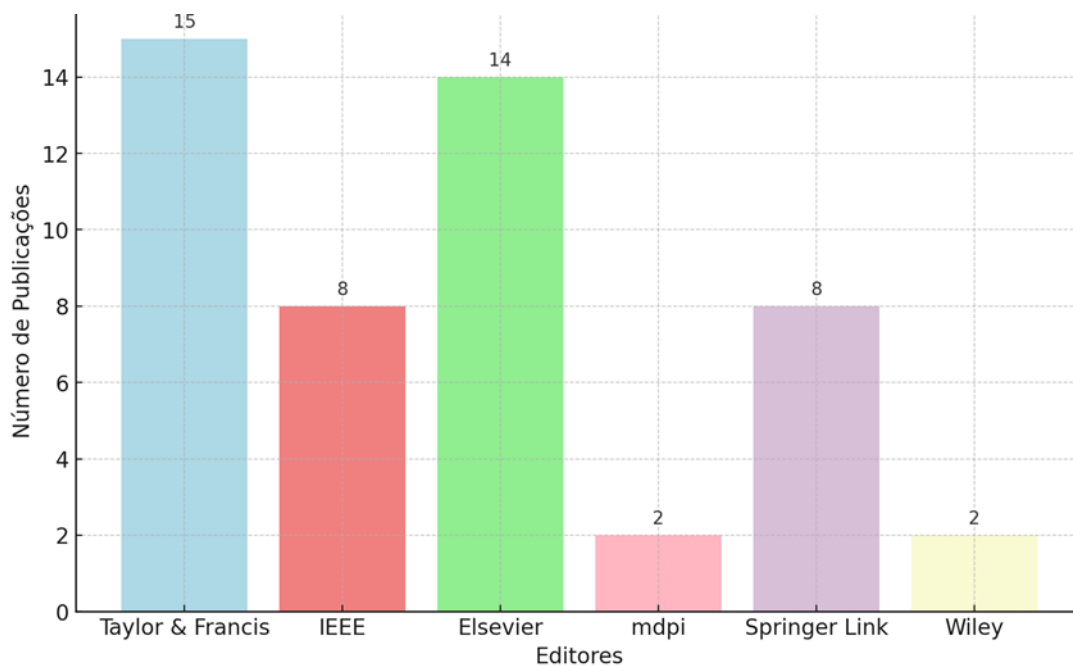


Figura 11 - Gráfico Publicações por Editor

Na Figura 12 verifica-se a distribuição dos blocos de estudo de cada artigo relativamente a cada paradigma de gestão no contexto da I4.0. Através do gráfico circular presente na figura, verifica-se que 38,6% dos resultados, pertencem à Gestão *Lean*. A elevada percentagem sugere que muitas organizações continuam a dar prioridade aos princípios *Lean*, combinando-os com a I4.0. O domínio da Gestão *Lean* indica que os métodos tradicionais centrados na eficiência continuam a ser muito valorizados, mesmo quando as empresas integram tecnologias mais avançadas. Este facto sugere uma abordagem híbrida em que as metodologias tradicionais são reforçadas com ferramentas digitais modernas para manter a competitividade no panorama da I4.0. A Gestão Ágil, que representa 24,6% do gráfico, sublinha a importância da flexibilidade e da adaptabilidade no ambiente de ritmo acelerado e em constante mudança que a I4.0 promove. A percentagem significativa de resultados referentes a métodos Agile indica um reconhecimento da necessidade das organizações se adaptarem rapidamente às mudanças tecnológicas, às exigências dos clientes e às alterações do mercado. As organizações estão a reconhecer cada vez mais a necessidade de serem ágeis para acompanharem os rápidos avanços tecnológicos e a evolução das condições de mercado. A Gestão Colaborativa representa 19,3% da distribuição e salienta a necessidade crescente de melhorar a coordenação e a integração dentro das organizações e entre elas. Esta porção do gráfico reflete a importância da colaboração para conseguir operações sem falhas num mundo digitalmente ligado. A Gestão em Tempo Real, com uma quota de 17,5%, realça a crescente dependência de dados em tempo real para a tomada de decisões em ambientes da I4.0. A adoção de práticas de Gestão em Tempo Real, embora seja a parte mais pequena do gráfico, é fundamental, pois permite que as organizações respondam rapidamente. Esta presença dos paradigmas de Gestão Colaborativa e em Tempo Real enfatiza a natureza interligada e orientada para os dados da I4.0.

De um modo geral, a figura indica que, no contexto da I4.0, há uma ênfase crescente na agilidade, na colaboração e nas capacidades em tempo real, embora os paradigmas

convencionais de gestão orientados para a eficiência, como o *Lean*, ainda sejam predominantes. A disparidade de prioridades e as dificuldades que as empresas têm ao implementar as tecnologias da I4.0 refletem-se provavelmente nesta distribuição.

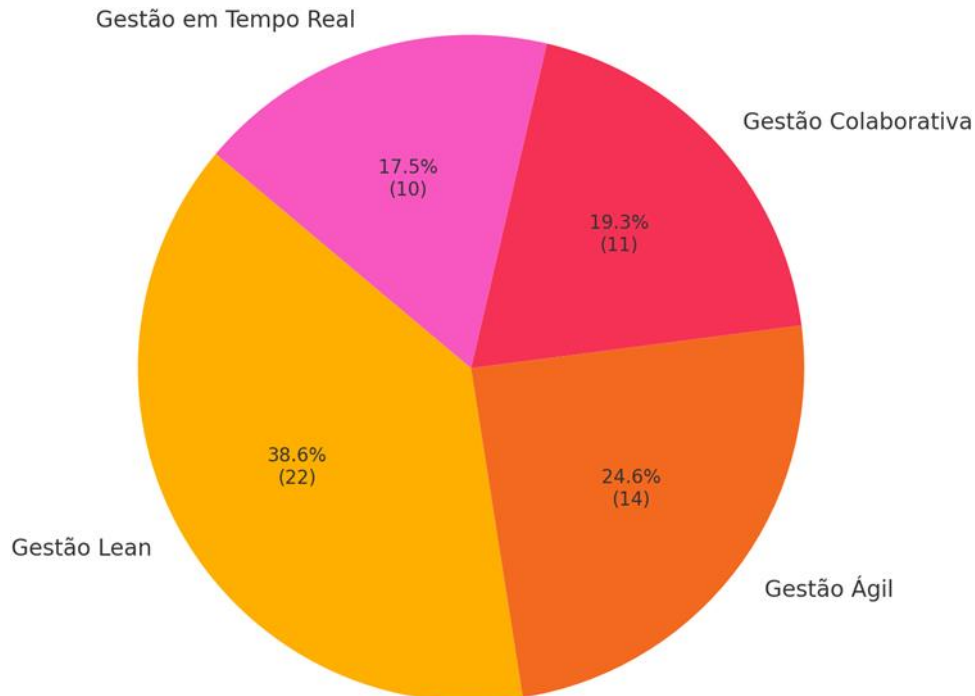


Figura 12 - Gráfico dos Diferentes Blocos de Estudo

Seguidamente, recorreu-se ao software VOSviewer para a obtenção de uma visão geral da interconexão dos temas abordados na dissertação. Primeiramente fez-se uma análise das palavras-chaves mais importantes e posteriormente a distribuição geográfica das principais contribuições sobre os paradigmas de gestão na I4.0.

A representação visual da relação entre as frases ligadas à I4.0 presente na Figura 13, ao *Lean Manufacturing* e aos sectores relacionados é fornecida pelo mapa de palavras-chave. Cada nó simboliza um termo e os *clusters* são codificados por cores para ilustrar grupos temáticos. As linhas que ligam os nós demonstram ligações ou co-ocorrências. “Indústria 4.0” é o nó mais visível no meio, indicando a sua posição crucial na rede. Está rodeado por frases importantes como “*management*”, “*Lean Manufacturing*”, “*systems*” e “*future*”, todas elas fortemente relacionadas entre si e que implicam uma ligação estreita em torno da I4.0. Os termos “*Lean Manufacturing*” e termos relacionados, como “*Lean Automation*”, “*production systems*” e “*methodology*”, estão localizados num *cluster* verde que indica como os princípios *Lean* estão integrados na estrutura da I4.0, que se centra na redução do desperdício e no aumento da eficiência através de tecnologias avançadas. A base técnica da I4.0 é representada pelo *cluster* vermelho, que contém frases como “*big data*”, “*internet of things*”, “*real-time systems*” e “*Collaborative Manufacturing*”. Estas ideias são essenciais para criar ambientes de produção inteligente orientados para os dados e a conectividade. O *cluster* azul liga termos como “*sustainability*”, “*performance*”, “*supply chain management*” e “*Agile Manufacturing*”, e destaca as formas como as tecnologias da I4.0 afetam o desempenho operacional, particularmente em relação à gestão eficaz da cadeia de abastecimento e às práticas

sustentáveis. Os nós amarelos e laranja, mais dispersos, contêm frases como “*integration*”, “*transformation*” e “*framework*”, que representam as estruturas estratégicas e os temas abrangentes da transformação digital necessários para que a implementação da I4.0 seja eficaz. No geral, o mapa destaca a complexidade e a diversidade desta transformação industrial, e mostra como a tecnologia, técnicas de gestão e métricas de desempenho, estão interligados em todo tema sobre a I4.0. Estas ideias são frequentemente abordadas em conjunto, evidenciado pelas ligações e proximidade entre os nós, o que reflete a sua interdependência nos processos de produção contemporâneos.

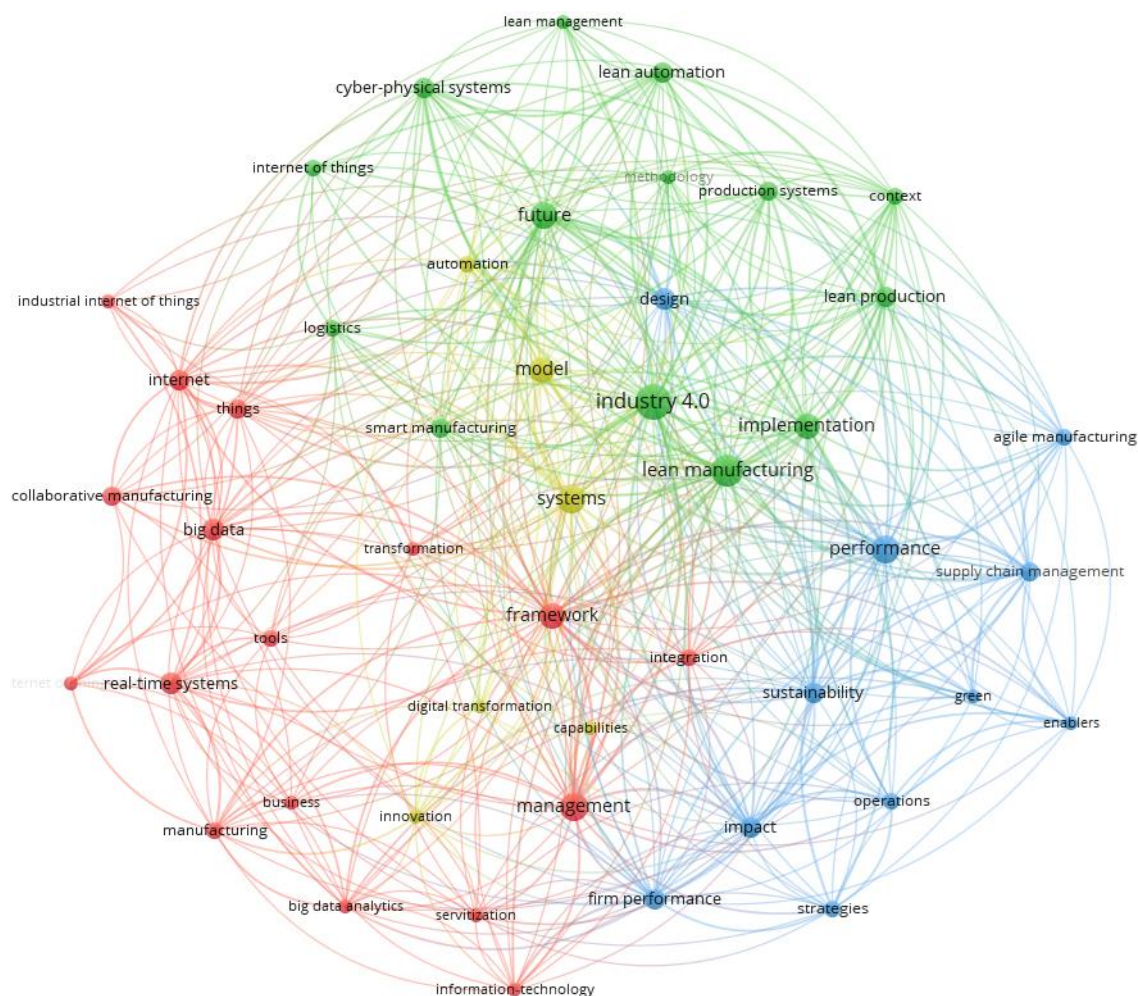


Figura 13 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, resultante da RSL

No que diz respeito à distribuição geográfica de contribuições significativas para os paradigmas de gestão na I4.0, é evidente que as publicações estão centradas em determinados grupos de nações. Grupos de investigação com interesses semelhantes estão frequentemente sediados nestas nações. A coautoria das publicações, que é representada graficamente pelas linhas que unem os círculos na Figura 14, mostra as nações de origem das principais contribuições para o tema. Países como os EUA, a China e a Alemanha têm nós maiores, e destaca a sua influência nas contribuições para o tema em questão, com extensas ligações a várias outras nações. Os EUA e a China, em particular, são centros principais, o que sugere que são atores chave nesta

rede global. As ligações azuis à direita, que ligam países escandinavos como a Noruega, a Suécia e a Finlândia, indicam diferentes tipos de interação em comparação com os grupos vermelhos e verdes à esquerda, que ligam os EUA, a China e vários países europeus. O gráfico sublinha os diferentes níveis de conectividade, com alguns países a desempenharem papéis centrais, enquanto outros são mais periféricos. Os grupos de cores sugerem agrupamentos regionais ou temáticos, refletindo interesses partilhados, proximidade geográfica ou contribuições semelhantes.

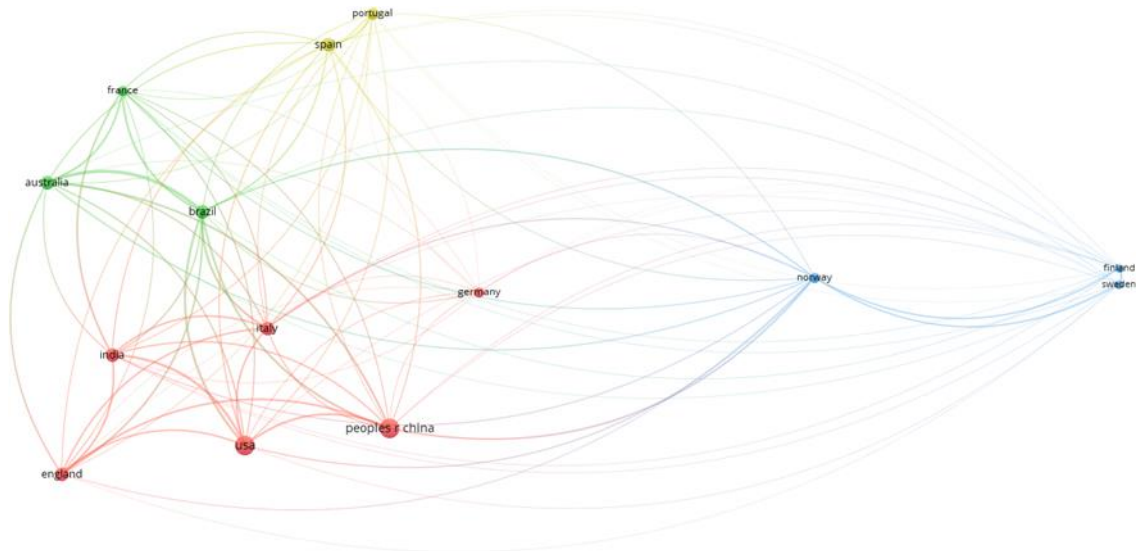


Figura 14 - Mapa dos países de origem das principais contribuições sobre paradigmas de gestão na I4.0. Assim, é possível ter uma perceção global dos resultados e quais as tendências relativas ao tema da dissertação são.

5.2. Avaliação dos Paradigmas de Gestão no Contexto da I4.0

Este subcapítulo, trata-se de uma análise aprofundada de vários paradigmas de gestão com o objetivo de melhorar os processos de tomada de decisão na gestão integrada. O objetivo da gestão integrada, uma abordagem abrangente da gestão organizacional, é maximizar a eficiência, a eficácia e a flexibilidade numa empresa ou instituição, ao recorrer ao alinhamento e ordenamento de diferentes atividades e processos. Sendo assim, são avaliados os diferentes paradigmas de gestão na perspetiva da I4.0 de forma a beneficiar a tomada de decisão.

Os ambientes de produção modernos e altamente especializados podem ter necessidades que os métodos *Lean* tradicionais podem não ser capazes de satisfazer. Neste ponto, a I4.0 torna-se crucial [29, 205]. Buer et al. [210], defende que em vez da Gestão *Lean* se tornar obsoleta pela I4.0, esta é crucial para maximizar as vantagens da digitalização. A utilização simultânea dos dois paradigmas melhora a flexibilidade, a qualidade, a produtividade e a rentabilidade dos processos industriais, podendo beneficiar severamente a gestão integrada. A I4.0 quando integrada nos sistemas *Lean* melhora a personalização e a flexibilidade. Assim, é permitida a personalização em massa sem sacrificar a eficiência, enquanto as técnicas tradicionais do sistema *Lean* dão ênfase à uniformidade e ao fluxo contínuo [198, 203], o que constitui uma

mudança substancial para sistemas de produção mais inteligentes e adaptáveis [201]. A integração destes dois paradigmas demonstra que a ligação entre os seus princípios e o desempenho operacional é mediada favoravelmente pelas práticas da Gestão *Lean* e da I4.0. Nomeadamente, nas práticas do local de trabalho e do fluxo de valor, tem-se verificado uma grande quantidade de efeitos benéficos [200], através das tecnologias da I4.0 que oferecem capacidades avançadas de análise de dados, monitorização em tempo real e automatização. Conjuntamente, com as técnicas *Lean* existe uma potencialização da qualidade do output do sistema [205].

No entanto, Tortorella et. al [203] verifica que a obtenção de ganhos de desempenho com a adoção de ambos os paradigmas depende da sua implementação nas fases inicial e intermédia e propõe métodos e tecnologias de arranque e de transição que registaram benefícios de desempenho mais elevados nas organizações, para garantir que as empresas conseguiram adquirir as competências necessárias e evitar adotar a tecnologia 4.0 demasiado cedo. Também se verifica, que as empresas que implementaram práticas *Lean*, têm maior probabilidade de implementar a I4.0 com sucesso, o que pode levar a ganhos notáveis no desempenho operacional. Isto sugere que os dois paradigmas têm uma associação positiva, melhorando a visibilidade, o controlo e a agilidade dos sistemas de produção [207]. Esta associação positiva é destacada também por Ahmad Sajjad et. al [199], pois defende que a integração da I4.0 requer, pelo menos, um grau rudimentar de implementação *Lean*, uma vez que oferece uma base sólida de fluxos de trabalho e processos otimizados, sobre os quais a tecnologia pode ser construída. Além disso, é salientado que a I4.0 é uma estratégia suplementar que expande o potencial da produção *Lean* otimizada e não um substituto para o mesmo [189]. Tortorella & Fettermann [207], demonstram também que a capacidade de utilizar simultaneamente a I4.0 e o *Lean* não é muito afetada pela dimensão da organização. Níveis semelhantes de adoção de práticas *Lean* e I4.0 foram utilizados tanto por grandes como por pequenas empresas, o que indica que a dimensão da organização não é uma barreira para alcançar um elevado desempenho com estas técnicas integradas. Sendo assim, para uma integração harmoniosa são identificados elementos essenciais como valores, focalização no cliente, excelência operacional, desenvolvimento pessoal, princípios *Lean* e competências orientadas para o um melhor desempenho. Também é proposto um forte ênfase na capacitação dos trabalhadores, no seu envolvimento e na melhoria contínua, enquanto se implementa a I4.0 associada da Gestão *Lean* [204].

A fim de otimizar os processos de produção, a junção destes dois paradigmas coloca um forte ênfase na tomada de decisões baseada em dados e na utilização de sistemas em rede. Para além de utilizar as capacidades da tecnologia contemporânea para atingir estes objetivos com maior sucesso, esta abordagem está em linha com o conceito *Kaizen* e eliminação de desperdícios [201]. A integração da I4.0 com a Gestão *Lean* oferece uma base de dados mais sólida para a tomada de decisões. Pode ser utilizada para uma maior compreensão das tendências do mercado, da dinâmica da cadeia de fornecimento e dos processos industriais. A otimização de processos, a atribuição de recursos e o planeamento de estratégias são melhorados por esta metodologia orientada para os dados. Facilita a gestão de risco e tomada de decisões [198, 200]. A Gestão *Lean* e a I4.0 juntos fornecem uma base sólida para a gestão integrada. Todos os níveis organizacionais podem tomar decisões bem informadas graças à

abordagem baseada em dados da I4.0. Os gestores são capazes de tomar decisões proactivas que melhoram a eficiência e a capacidade de resposta, devido ao acesso a dados em tempo real sobre o desempenho da produção e o estado da cadeia de fornecimento [33]. Assim, é possível manter as vantagens competitivas num mercado em rápida mutação, pois esta integração apoia um ambiente de produção mais dinâmico e reativo [213].

O alinhamento da Gestão *Lean* com a I4.0 também aborda os obstáculos e problemas socioeconómicos que podem impedir que estas tecnologias sejam amplamente adotadas. Um grande problema, especialmente para as empresas em países emergentes e PME's, é o investimento de capital substancial associado à integração de tecnologia sofisticada [189, 198 – 200]. As empresas que operam em economias desenvolvidas possuem frequentemente um acesso superior a tecnologias de ponta e a uma mão de obra altamente qualificada, o que promove uma maior adoção da I4.0 [198]. À medida que a I4.0 se torna mais globalizada, a redução de custos da tecnologia da I4.0 torna-se uma mais-valia, o que pode ajudar as empresas de economias em desenvolvimento e PME's a adotarem estes paradigmas. Estes obstáculos também podem ser ultrapassados através da liderança certa e esforços calculados, o que aumenta a adoção destes dois paradigmas [199]. Embora possam existir obstáculos devido aos elevados custos de capital e à exigência de competências especializadas, estes são frequentemente compensados pelos ganhos em termos de aumento da produtividade e de melhoria da qualidade [207]. Através da utilização de elementos críticos de sucesso como a adoção da digitalização, o cultivo de uma cultura de melhoria contínua e a conquista da gestão de topo, a estrutura centra-se na superação dos desafios mencionados anteriormente [209].

Relativamente à sustentabilidade, a integração da tecnologia da I4.0 melhora consideravelmente os resultados da Gestão *Lean* nos aspetos económicos, ambientais e sociais, mesmo que a esta, por si só, possa não estar altamente correlacionada com a sustentabilidade [202, 208]. Assim, é promovido os princípios da economia circular e redução da produção de energia e de resíduos no sector industrial. A nível social, melhora as condições de trabalho, reduz as taxas de acidentes e aumenta o envolvimento dos trabalhadores na tomada de decisões [202]. S. Gatell & Avella [204] defendem que a junção destes dois paradigmas podem melhorar a participação dos trabalhadores, a poupança de recursos, a flexibilidade e a sustentabilidade ambiental, posiciona as empresas num lugar propício a prosperar num mercado tecnologicamente avançado e ecologicamente sensível. Kamble et al. [208], argumenta que a utilização da I4.0 melhora as práticas otimizadas que por sua vez, tem um impacto direto favorável no desempenho sustentável a longo prazo de uma organização, sendo que a interação entre a I4.0 e o desempenho operacional sustentável é mediada por métodos *Lean*.

Referente à Gestão Ágil, esta é uma boa opção para um ambiente naturalmente dinâmico e em rede da I4.0, visto que coloca uma forte ênfase na flexibilidade e na rápida adaptação à mudança. Propicia a integração da I4.0 e suporta a Gestão Ágil [197]. Esta integração é especialmente importante para concretizar o potencial da I4.0 nos atuais contextos de produção [215]. Ding et al. [33] afirma ainda que, a integração da I4.0 com a abordagem de Gestão Ágil, iria potencializar principalmente a flexibilidade relativamente ao desempenho. Assim, a combinação de técnicas ágeis com a I4.0 permite uma monitorização em tempo real e

uma resposta rápida às dificuldades emergentes, o que é fundamental para manter a excelência operacional nos ambientes industriais modernos [211].

Ding et al. [33], demonstra que a I4.0 apoia e melhora as metodologias de Gestão *Lean* e Ágil. Refere que estas metodologias podem coexistir simultaneamente e complementarmente. Destaca a forma como a I4.0 pode revolucionar o desenvolvimento de processos de produção mais robustos e flexíveis, através da associação com a Gestão *Lean* e Gestão Ágil. A I4.0 permite que as empresas integrem com eficácia ambas as estratégias de gestão ao mesmo tempo, eliminando os compromissos convencionais entre flexibilidade e eficiência de custos. Oliveira-Dias et al. [208] e Raji et al. [214] sugerem que, embora ambos os paradigmas tenham sido historicamente percebidos como mutuamente incompatíveis, essa observação ressalta a natureza complementar das estratégias *Lean* e ágil. Afirma que a I4.0 oferece uma abordagem mais integrada que capitaliza as vantagens de ambas as técnicas. Todavia Dias et al. [212], salienta o facto de as técnicas *Lean* e ágeis não serem igualmente afetadas I4.0. Estas tecnologias têm um impacto direto menos perceptível na Gestão Ágil, apesar do aumento da eficiência e da redução do desperdício. A Gestão *Lean* associada da I4.0 promove a agilidade de uma forma indireta, o que pode significar que a Gestão *Lean* pode servir de ponte para práticas ágeis, ao oferecer a consistência e a eficácia necessárias para uma resposta ágil.

Rauch et al. [217], define princípios-chave para a criação de sistemas de produção flexíveis e ágeis no contexto da I4.0, nomeadamente, integração de sistemas de informação modernos para a gestão de dados em tempo real do chão de fábrica, a adoção de estruturas de produção modulares, e escaláveis e a utilização de dispositivos móveis e inteligentes para melhorar os processos de tomada de decisões. Na mesma perspetiva, são identificados indicadores de agilidade essenciais para gerir a incerteza e adaptar-se às rápidas mudanças no ambiente empresarial, incluindo a resiliência, que ajuda as organizações a lidar com perturbações e a recuperar rapidamente de contratempos, as capacidades tecnológicas e a inovação centrada no cliente, que garante que a organização não perde de vista os seus objetivos de satisfação dos clientes. Estes indicadores são cruciais para alcançar uma integração harmoniosa e manter a eficácia operacional [218]. Korucuk et al. [216] identifica também elementos cruciais para o sucesso da Gestão Ágil no contexto da I4.0. Estes elementos consistem em estreita cooperação com os fornecedores, na melhoria contínua e proactiva, na comunicação proactiva e no apoio ativo da gestão de topo. E propõe metodologias que oferecem um quadro sólido para avaliar uma variedade de critérios e opções, ao ajudar simultaneamente a gerir a ambiguidade e a bipolaridade inerentes aos processos de tomada de decisão, o que melhora também a gestão de risco.

Do ponto de vista da I4.0, o paradigma de Gestão Ágil fornece um método organizado para lidar com as incertezas e complexidades presentes nos sistemas industriais contemporâneos, o que auxilia a tomada de decisão na gestão integrada [193]. Os gestores podem agir de forma proactiva para resolver problemas e otimizar constantemente as operações, ao fazer escolhas bem informadas e rápidas, graças a uma maior visibilidade dos dados e a análises em tempo real. Com a ajuda desta estratégia integrada, podem ser desenvolvidas capacidades de produzir bens personalizados em grande escala sem ter de fazer grandes compromissos em termos de qualidade, custo ou entrega [186, 212 – 214, 218, 238].

Por fim, Roy et al. [238] demonstra que a implementação da I4.0 advém consigo benefícios práticos da *Digital-Agility*, como as capacidades em tempo real que melhoram a partilha e a qualidade da informação, levando ao aumento da agilidade. Revela reduções nos ciclos de tomada de decisão e melhora o desempenho global.

Relativamente à Gestão Colaborativa, este paradigma encontra-se em linha com as ideias da I4.0, que valorizam a ligação, a tomada de decisões baseada em dados e a incorporação da tecnologia digital nos processos de produção. Este alinhamento enfatiza a importância crucial da cooperação para utilizar plenamente a I4.0 em toda a sua extensão e melhorar a capacidade de resposta e a eficiência operacionais [220]. As redes de colaboração associadas à I4.0 permitem que as empresas ultrapassem eficazmente os desafios dos atuais contextos de produção, ao promover a resiliência, a sustentabilidade e a conectividade [221]. A natureza colaborativa alinha-se com a ênfase da I4.0 na flexibilidade e adaptabilidade [228]. Através da ligação digital pode-se remodelar deliberadamente as operações de uma empresa e as interações com os clientes, conduzindo à criação de valor a longo prazo [227].

Um dos principais componentes do paradigma da Gestão Colaborativa da I4.0 é o afastamento das estruturas hierárquicas em direção às parcerias. É necessário quebrar os silos organizacionais convencionais e promover a cooperação dentro da empresa, bem como entre os seus parceiros, fornecedores e clientes, de modo a implementar com êxito a servitização digital. Assim é promovida agilidade, que permite às empresas implementar processos comerciais mais adaptáveis que aumentam o valor dos seus serviços através de um maior envolvimento de todas as partes interessadas [219].

No entanto Jardim-Goncalves et al. [224], afirma que as redes de colaboração podem tornar-se menos reativas e eficientes se os diferentes processos empresariais e dados não forem compatíveis entre si. Assim é identificada a necessidade de uma comunicação sem descontinuidades para o funcionamento eficiente da rede. Nahian Al Sunny et al. [222], na perspetiva da I4.0, indica que a comunicação é a componente mais importante para o sucesso da Gestão Colaborativa, pois a capacidade de ligar e controlar os recursos da organização em locais geograficamente dispersos permite dinamismo e flexibilidade, que são fundamentais para reagir às exigências em constante mudança dos mercados globais. Esta capacidade fornecida pela implementação da I4.0 permite a cooperação distribuída entre equipas geograficamente separadas e contribui para uma colaboração harmoniosa [220]. Assim, o paradigma de integração colaborativo permite que as empresas combinem dinamicamente parceiros, serviços e componentes de forma a melhorar o cumprimento do serviço e minimizar a cooperação desnecessária [193].

Franzè et al. [227], destaca como a conectividade digital aumenta a transparência, a confiança e a colaboração entre empresas e clientes, ao conduzir a soluções altamente personalizadas e a recursos digitais integrados entre compradores e fornecedores. Este aspeto torna-se crucial nos contextos da I4.0, uma vez que a capacidade de co-criar e personalizar o valor com os consumidores constitui uma grande vantagem competitiva.

Moghaddam et al. [193], sustenta que a capacidade de gerir serviços partilháveis e não partilháveis da Gestão Colaborativa através de uma correspondência dinâmica apoia a

flexibilidade e a resiliência necessárias nos sistemas da I4.0. A integração destes dois paradigmas melhora a utilização dos recursos numa rede dispersa, ao reduzir a cooperação inútil e aumentar o cumprimento dos serviços. Camarinha-Matos et al. [221], identifica o conceito de corresponsabilidade como crucial na I4.0, onde a interconexão de organizações, pessoas e sistemas desempenha um papel central na sustentabilidade e resiliência. Não pode ser da responsabilidade apenas de entidades individuais, requer um esforço coletivo de várias partes interessadas através de uma rede de colaboração. Ademais, as redes colaborativas ajudam na redução de resíduos e na promoção da eficiência dos recursos, pois permite o intercâmbio de materiais, energia e informação entre várias entidades. Promove a economia circular e a simbiose industrial, bem como a sustentabilidade ambiental e social aspetos importantes da I4.0.

Ao integrar Gestão Colaborativa com a I4.0 é possível uma tomada de decisões mais informada, tanto a nível tático como estratégico [220]. Esta abordagem focada na comunicação e nos dados promove uma tomada de decisão mais inteligente e rápida na gestão integrada, facilitando a comunicação e a cooperação entre recursos industriais dispersos [193]. Através do acesso a todas as informações e conhecimentos pertinentes num único sistema, esta interligação facilita a tomada de decisões holística e permite obter uma compreensão mais profunda do processo de produção [206].

Finalmente, num ambiente colaborativo na I4.0, os robôs colaborativos são cruciais, pois apresentam benefícios notáveis em termos de eficiência, versatilidade e ajustabilidade, porém também apresentam obstáculos notáveis no que respeita à segurança e proteção. Assim, a integração da cooperação homem-máquina nos processos industriais levou a uma maior complexidade, que tem de ser abordada pelos paradigmas em questão [225]. Além disso, a comunicação semântica máquina-máquina pode melhorar a automação colaborativa no *smart manufacturing*, ao permitir o controlo descentralizado da produção. Ao melhorar a adaptabilidade, a produtividade e a inteligência nos processos industriais, a estrutura de produção aproxima-se dos objetivos fundamentais da I4.0 [226].

No que respeita à Gestão em Tempo Real na perspetiva da I4.0, desempenha um papel crucial na otimização dos processos de tomada de decisão nos sistemas de gestão integrados. A implementação destes dois paradigmas refere-se ao processamento, análise e utilização instantâneos e contínuos de dados produzidos por dispositivos e sistemas interligados [231]. A Gestão em Tempo Real neste contexto, é crítica para preservar a capacidade de resposta e a eficiência dos sistemas interligados [233]. Assim, a combinação destes paradigmas permite que as empresas reajam de forma rápida e precisa a alterações nas exigências do mercado, nas circunstâncias de produção e noutros fatores dinâmicos [229]. Cria sistemas flexíveis e reativos que possam satisfazer a necessidade crescente de personalização, prazos de produção mais curtos e uma gestão eficaz dos recursos [237]. Esta mudança de paradigma é especialmente significativa porque transforma os dados num ativo que tem de ser convenientemente gerido e regulado [229].

As organizações podem recolher e tratar os dados à medida que são criados permitido pela integração da I4.0 e da Gestão em Tempo Real, o que melhora a capacidade de reação e possibilita respostas rápidas a situações em mudança. Assim, é melhorada a coordenação dos

departamentos e das fases da cadeia de valor, ao conduzir a uma afetação de recursos mais eficaz e a menos tempo de inatividade [229]. Otimiza a visibilidade em toda a organização, para decisões mais coordenadas e informadas [231]. O acompanhamento e a localização em tempo real dos recursos podem melhorar as opções de planeamento, programação e controlo, e consequentemente o desempenho global do sistema de produção [235].

Trovati et al. [232], aponta que o grande volume de dados gerados pela Gestão em Tempo Real pode sobrecarregar os sistemas tradicionais de processamento de dados, o que leva a ineficiências na tomada de decisões. Deste modo, uma das principais vantagens da integração da I4.0 neste paradigma é a sua capacidade de tratar e aperfeiçoar grandes volumes de dados gerados num ambiente de produção complexo [234]. A escalabilidade e a flexibilidade fornecidas pela I4.0 são essenciais para gerenciar as grandes quantidades de dados gerados. As soluções de processamento e armazenamento distribuídas garantem que o sistema pode ser dimensionado para acomodar volumes de dados crescentes e manter os níveis de desempenho, mesmo quando a complexidade do processo de produção aumenta [230]. A capacidade de rever e alterar constantemente a quantidade de informação processada garante a adaptabilidade do sistema às mudanças, e leva a ações mais precisas e atempadas [232].

Yu et al. [230], defende que processamento de dados em tempo real é fundamental para a deteção de falhas e manutenção preditiva, pois facilita a monitorização contínua do equipamento e a deteção precoce de problemas. Esta estratégia proactiva reduz o tempo de inatividade não planeado, otimiza a atribuição de recursos e aumenta a longevidade das máquinas. A aquisição destas informações espaço-temporais em tempo real sobre os recursos da organização melhora significativamente a eficiência operacional [234].

A Gestão em Tempo Real no contexto da I4.0, permite a tomada de decisões proactivas e preditivas nas organizações. Estes sistemas podem prever possíveis interrupções ou ineficiências e tomar medidas corretivas antes que estas se agravem, graças a uma análise sofisticada e à *Machine Learning* [231]. A monitorização e a gestão em tempo real de recursos como trabalhadores, equipamento e materiais permitem uma tomada de decisões mais eficaz e rápida, que é uma componente essencial da I4.0 [235].

Por último, Nedjwa et al. [206] aponta que a Gestão em Tempo Real em conjunto com a I4.0 possibilita práticas de Gestão *Lean* mais dinâmicas e reativas. Permite avaliar grandes volumes de dados em tempo real, fornecendo informações que ajudam a descobrir ineficiências e oportunidades de melhoria no processo. Esta capacidade apoia os conceitos *Lean*, ao permitir intervenções mais precisas e atempadas, diminuindo o tempo de inatividade e otimizando a atribuição de recursos.

Assim, através das contribuições identificadas é possível uma melhor gestão organizacional. Verifica-se que todos os paradigmas associados à I4.0 são viáveis para uma gestão integrada bem-sucedida de forma a beneficiar a tomada de decisão.

5.3. Tecnologias I4.0

Neste subcapítulo, são avaliadas as contribuições da tecnologia da I4.0 para cada paradigma de gestão referido na dissertação. Verifica-se como as tecnologias da era da digitalização podem influenciar a integração, através das suas características e de como estas interagem com os paradigmas de gestão específicos.

As tecnologias da I4.0 são necessárias para otimizar ainda mais as práticas *Lean*, e esta integração pode melhorar o desempenho operacional através da utilização dos pontos fortes de ambos os paradigmas [198]. São reconhecidas como facilitadoras essenciais da otimização dos processos *Lean* [207]. Permite aos processos industriais tornarem-se mais automatizados, mais ligados e mais orientados para os dados na sua tomada de decisões [203]. Estas tecnologias melhoram consideravelmente a eficiência, a adaptabilidade e a capacidade de resposta dos processos *Lean*, pois possibilita a recolha de dados, o processamento e a tomada de decisões em tempo real [199].

Os princípios fundamentais da Gestão *Lean* - redução de resíduos e melhoria contínua - podem ser abordados de uma forma mais dinâmica e reativa com a integração da tecnologia da I4.0 nos métodos *Lean*. Por exemplo, a automatização da recolha e análise de dados através da utilização da IoT e de CPS em processos industriais permite a deteção em tempo real de ineficiências e a implementação de ações corretivas imediatas de problemas que possam resultar em desperdício. Assim, se reduz o desperdício, aumenta a eficiência global do processo e diminui o tempo de inatividade [29, 199]. Ao fornecer informações precisas e rápidas, necessárias para tomar decisões bem informadas que otimizam os processos, contribui-se para o conceito *Lean* de melhoria contínua (*Kaizen*) [200]. Muitos procedimentos da Gestão *Lean* podem ser automatizados através da utilização de CPS e IoT, aumentando a flexibilidade e a adaptabilidade do processo [198]. As ferramentas *Lean* são complementadas por IoT e CPS. Os sensores IoT, por exemplo, fornecem inventário em tempo real e monitorização do estado da produção em sistemas de produção *Just-In-Time*, ao reduzir o desperdício e melhorar a capacidade de resposta aos pedidos dos clientes. Também automatiza a recolha de dados para o mapeamento do fluxo de valor, tornando-a mais precisa e menos trabalhosa [189, 206, 211].

Nedjwa et al. [206], aponta que CC e a realidade aumentada como muito promissoras para melhorar a metodologia *Lean*. Ao fornecer recursos escaláveis e adaptáveis, a CC complementa as técnicas *Lean* e permite que as empresas lidem eficazmente com fluxos de trabalho complicados e grandes quantidades de dados. A Realidade Aumentada melhora a formação e a visualização em ambientes *Lean*, visto que ajuda os funcionários a compreender e a aplicar os princípios *Lean* de forma mais eficaz. Também refere que a *Big Data* e a sua análise melhoram a eficácia das estratégias *Lean*, como o Mapeamento do Fluxo de Valor, a Padronização, a Melhoria Contínua (*Kaizen*) e a Manutenção Produtiva Total (TPM). A *Big Data* oferece uma tomada de decisão mais precisa e rápida, ao fornecer dados em tempo real e análises avançadas, o que é fundamental para melhorar as operações *Lean* e reduzir o desperdício. Além disso, o autor identifica as ferramentas *Lean* mais frequentemente associadas a Tecnologias I4.0 específicas e fornece um quadro para a aplicação estratégica destas tecnologias para melhorar as práticas *Lean*.

A Realidade Virtual, a Realidade Aumentada, a *Blockchain Technology* e a IA são exemplos de tecnologias que podem ser integradas nas técnicas *Lean* para melhorar as ferramentas e processos existentes. Estas tecnologias oferecem monitorização em tempo real, análises melhoradas e capacidades de previsão. Os processos *Lean* tornam-se ainda mais eficientes e produtivos com estas tecnologias, que simplificam ainda mais as operações e reduzem o desperdício [199]. Além disso, as organizações podem aumentar a eficiência operacional, diminuir a dependência do trabalho humano e reduzir o risco de erros e atrasos através da utilização da IA e do *Machine Learning* [201]. A IA e os robôs autónomos desempenham um papel importante na promoção dos conceitos *Lean*, automatizando processos e diminuindo a necessidade de interação humana. Esta automatização reduz os erros, encurta os tempos de ciclo e maximiza a utilização dos recursos, sendo todos estes objetivos críticos da Gestão *Lean*.

Sony [15] assinala ainda que, na Indústria 4.0, a integração vertical une subsistemas dentro de uma empresa para estabelecer um sistema de produção flexível que é influenciado por conceitos otimizados, como o mapeamento do fluxo de valor e a concentração do valor para o cliente. A integração horizontal enfatiza os conceitos *Lean*, utilizando a tecnologia digital para ligar muitas empresas ao longo de uma cadeia de abastecimento.

Kamble et al. [208] verifica que, o *Lean Manufacturing* beneficia grandemente do efeito direto e benéfico das Tecnologia I4.0. Indica que, a incorporação desta tecnologia nos sistemas de produção melhora a aplicação dos princípios *Lean* e oferece o enquadramento digital necessário para operações mais precisas e eficazes. Esta tecnologia possibilita às organizações os meios para utilizar os princípios *Lean* com maior sucesso e a integração destes dois paradigmas não só é possível como também bastante vantajosa para as empresas que tentam manter-se competitivas [185]. As Tecnologias I4.0, com o seu processamento de dados em tempo real, comunicação melhorada e características de automatização, são vitais para ajudar a ultrapassar as deficiências das ferramentas *Lean* clássicas. A combinação da Tecnologia I4.0 e da Gestão *Lean* pode resultar na criação do *Lean 4.0*, uma versão mais sofisticada e digitalmente melhorada das técnicas *Lean* clássicas [206]. Porém advém, elevados custos de implementação e a escassez de pessoas com formação são impedimentos significativos à adoção generalizada da Tecnologia I4.0 [207].

Finalmente Tortorella et al. [203], distingue as Tecnologias I4.0 entre dois agrupamentos "*In-transition*" e "*Advanced*", no contexto da Gestão *Lean*. As metodologias *Lean* e as Tecnologias I4.0 de complexidade média, como RFID e sensores, estão incluídas no *cluster* "*In-transition*" e melhoraram o desempenho operacional e facilitam a transição de sistemas *Lean* convencionais para implementações mais sofisticadas de *Lean 4.0*. A CC, *Big Data*, realidade aumentada e outras tecnologias I4.0 de alta complexidade estão incluídas no *cluster* "*Advanced*". Embora estas tecnologias possam aumentar muito o desempenho, quando os investimentos se aproximam mais dos limites de desempenho do sistema, os seus efeitos podem tornar-se menos pronunciados.

No contexto da Gestão Ágil, as Tecnologias 4.0 permitem a comunicação em tempo real e a abertura da informação, que são fundamentais para permitir métodos de gestão ágeis. Facilitam a integração harmoniosa de diversos recursos e procedimentos de produção, conferindo agilidade ao sistema [197]. Contribuem significativamente para o paradigma da

Gestão Ágil, pois permitem uma tomada de decisões mais informada e mais rápida, oferecendo a agilidade necessária para prosperar em circunstâncias de mercado instáveis [186, 215]. Estas tecnologias quando integradas na Gestão Ágil, aumentam sobretudo a flexibilidade da organização [33]. Apoiam as práticas ágeis, ao permitir tempos de resposta mais rápidos, maior flexibilidade na produção e um melhor serviço ao cliente através de uma melhor tomada de decisões baseada em dados [214].

Certas Tecnologias I4.0 têm um forte poder de acionamento, o que significa que têm um elevado potencial para permitir várias práticas *Lean* e ágeis [214]. No entanto Oliveira-Dias et. al [212] defende que, as Tecnologias 4.0 não apresentam o mesmo impacto na Gestão Ágil que na Gestão *Lean* e evidencia que impacto direto das mesmas nas metodologias ágeis é menos claro. Afirma que, estas tecnologias podem ter efeitos mais indiretos nas práticas ágeis, o que exige potencialmente recursos adicionais ou tecnologias complementares para aproveitar todo o potencial. Porém admite também que, as Tecnologias I4.0 podem funcionar como uma ponte entre as metodologias *Lean* e Ágil, agindo como facilitadores. Em concordância Ding et al. [33] confirma também que, a Gestão *Lean* e a Gestão Ágil podem coexistir e beneficiar uma da outra graças à tecnologia I4.0. Ao equilibrar a flexibilidade e a relação custo-eficácia, esta integração ajuda as organizações a tornarem-se mais competitivas no mercado. Sendo assim, Tripathi et al. [211], propõe uma metodologia Mapeamento do Fluxo de Valor que integra Tecnologias I4.0 e cria um ambiente de produção mais dinâmico e reativo. A metodologia melhora a tomada de decisões, reduz o tempo de inatividade e aumenta a eficiência operacional global, fundamental para um sistema de Gestão Ágil.

A integração da tecnologia da I4.0 melhora a agilidade e está relacionada com a filosofia de Gestão Ágil. Este paradigma dá prioridade à flexibilidade, aos métodos centrados no cliente e à rápida capacidade de resposta às alterações do mercado, características essenciais que são consideravelmente melhoradas pelas capacidades da I4.0 [216]. Tecnologias como os sistemas CPS, a IoT, a *Big Data*, CC e AI permitem a recolha e análise de dados em tempo real e contribuem para uma maior agilidade nos sistemas industriais [197, 216]. IoT e CPS, permitem às empresas acompanhar o historial e a localização de produtos e componentes ao longo do processo de produção. Através da *Big Data* e CC, é possível monitorizar processos e operações em tempo real. Assim no sistema é conferida agilidade pelo meio de dois pilares fundamentais rastreabilidade e visibilidade [238].

O desempenho e a integridade das organizações dependem das táticas de redução dos riscos, que são apoiadas pelas Tecnologias 4.0. A IoT facilita a vigilância contínua das atividades do sistema, detetando possíveis perturbações antes da sua intensificação. Ao examinar tendências e padrões que podem não ser facilmente visíveis utilizando técnicas convencionais, a análise de grandes volumes de dados e a IA podem antecipar e reduzir os perigos [216].

Gunasekaran et. al [215], identifica a *Big Data* como um facilitador crucial na Gestão Ágil, ao facilitar a recolha, análise e aplicação de grandes volumes de dados. Essa competência permite que as organizações respondam rapidamente às necessidades do mercado e se adaptem a mudanças. Melhorias na previsão da procura e na otimização da cadeia de abastecimento, focadas em flexibilidade e rapidez, permitem alinhar a produção com a demanda do mercado, reduzindo prazos e aumentando a satisfação do cliente. Empresas que utilizam *Big Data* com

sucesso relatam melhorias significativas na qualidade do produto, economia de custos e tempo de comercialização. A implementação bem-sucedida de *Big Data* depende de sua integração perfeita nos processos existentes, apoiando o paradigma de Gestão Ágil e reforçando os objetivos da I4.0, como automação, transparência de dados e otimização de processos. *Big Data* serve também de ferramenta e estrutura para alcançar o potencial máximo da Gestão Ágil na I4.0.

Finalmente, Oliveira-Dias et al. [186], divide as Tecnologias 4.0 em duas categorias nomeadamente madura e emergente, no contexto da Gestão Ágil. Esta classificação permite uma análise aprofundada das formas como as tecnologias em diferentes graus de desenvolvimento afetam a agilidade no sistema. As tecnologias avançadas, como a RFID e o *Enterprise Resource Planning* (ERP), já são amplamente usadas e melhoram consideravelmente a integração e a eficiência. Os sistemas ERP são muitas vezes rígidos, mas ao proporcionarem visibilidade em tempo real e uma melhor coordenação dos parceiros, a sua integração com outras tecnologias pode aumentar a agilidade. A RFID também melhora a transparência das informações, que são essenciais para decisões rápidas. As tecnologias emergentes incluem *Blockchain Technology*, IoT e IA. A IoT oferece monitorização e rastreio em tempo real, aumentando a capacidade de resposta, enquanto a IA otimiza a gestão, automatiza a tomada de decisões e melhora o serviço ao cliente. A *Blockchain Technology* melhora a segurança e a transparência das transações, que são essenciais para promover a confiança e garantir a flexibilidade nas organizações.

Relativamente à Gestão Colaborativa, para que este paradigma responda eficazmente às complexidades e aos problemas da produção contemporânea, é essencial um fluxo de informação fluido e a colaboração entre várias organizações [221]. As Tecnologias 4.0 permitem novas formas de criação de valor, ao aumentar a transparência, a confiança e a colaboração entre as empresas e os seus consumidores [227]. Estas tecnologias permitem um processo mais flexível e reativo, capaz de se ajustar rapidamente às necessidades em constante mudança dos clientes. Disponibiliza a capacidade de comparar resultados simulados com dados de produção reais em tempo real e melhora o ciclo de feedback entre a conceção e a produção, o que torna todo o processo mais eficiente e colaborativo [220]. Assim, as Tecnologias 4.0 desempenham um papel importante no incentivo à colaboração entre muitas partes interessadas, necessária para que os sistemas industriais sejam sustentáveis e resilientes [221].

Uma maior integração e interligação entre os componentes digitais e físicos dos sistemas de produção são possíveis graças às Tecnologias 4.0, como os *Digital Twins*, a IoT e os CPS. A transparência, a tomada de decisões e a agilidade são melhoradas por esta ligação, que facilita a troca de dados em tempo real e a comunicação entre os vários níveis da empresa, desde a produção à gestão [221]. A integração da IoT e dos CPS permite uma monitorização contínua dos sistemas digital e físico e facilita reações rápidas a possíveis riscos [225]. A IoT no âmbito do paradigma da Gestão Colaborativa combina recursos variados, tanto humanos como de máquinas, para formar um sistema coerente que se pode adaptar a condições e requisitos em mudança. Esta estrutura permite a afetação dinâmica de trabalhos e recursos e torna os processos de produção mais flexíveis e sensíveis às exigências dos clientes [228]. A IoT quando também associada a ambientes de simulação de Realidade Virtual permite que as equipas

interajam com protótipos virtuais e físicos, ao afinar os fluxos de processos e as disposições de montagem antes da implementação. Assim, reduz-se o tempo e as despesas associadas aos procedimentos tradicionais de tentativa e erro [220].

Lu & Asghar [226], apontam que numa perspectiva de gestão colaborativa, a capacidade de conseguir uma comunicação a nível semântico entre máquinas é crucial. Sendo assim, propõem um conceito denominado de “CPS com consciência semântica”, concebido para melhorar a interoperabilidade e a comunicação entre vários CPS numa rede de colaborativa. Para tal, é necessário acrescentar uma camada de comunicação e uma camada semântica à conceção convencional dos CPS. Para conseguir uma verdadeira interoperabilidade num ambiente de colaboração, estas camadas permitem que as máquinas compreendam e interpretem o significado dos dados que trocam num contexto comum.

O CPS quando integrado conjuntamente com CC facilita a operação direta e a monitorização de máquinas e ferramentas a partir de locais geograficamente distribuídos. Permite a integração perfeita de vários recursos de fabrico em vários locais e promove um ambiente mais ligado e colaborativo [222]. No que diz respeito a CC no contexto da Gestão Colaborativa, esta tecnologia facilita a modularização e a orientação para os serviços dos processos de produção e permite que os serviços e componentes sejam organizados, combinados e partilhados entre empresas [193].

Bin Chen et al. [225], enfatiza a importância dos *cobots* como uma tecnologia que se destina a trabalhar ao lado de pessoas em espaços de trabalho partilhado. Potencializam comunicação e cooperação estreitas entre humanos e máquinas na produção colaborativa.

Assim, as organizações são muito mais resilientes devido às Tecnologias 4.0, que permitem a integração horizontal e vertical. Os processos tornam-se mais resistentes a perturbações quando são organizados em redes interligadas de máquinas inteligentes, operadores humanos e sistemas autónomos. Os quadros colaborativos que permitem que várias entidades operem em conjunto, reorganizando-se rapidamente e recuperando de perturbações, melhoram ainda mais esta flexibilidade, ou resiliência [221]. Assim, as empresas que utilizam a Tecnologia 4.0 para melhorar as operações internas e interagir mais plenamente com os consumidores consequentemente, estão a “*co-designing*” e a “*co-engineering*” bens para garantir que estes correspondam às necessidades dos clientes. Ao garantir que os produtos satisfazem ou ultrapassam as expectativas dos consumidores, esta estratégia melhora a criação de valor e reforça as parcerias comerciais a longo prazo [227].

A Gestão em Tempo Real assenta fortemente na capacidade de processar, analisar e atuar sobre os dados à medida que estes são gerados. Sendo assim, as Tecnologias 4.0 desempenham o papel crucial de facilitar os processos referidos [229]. Neste contexto, é importante a recolha de informações espaço-temporais em tempo real sobre os recursos de fabrico, pois é fundamental para melhorar a eficiência operacional das organizações [234]. A manutenção da sincronização operacional num cenário industrial dinâmico requer, a funcionalidade de recolha de informações em tempo real da estrutura, alinhando-se com os objetivos da Tecnologia 4.0 [235].

Zhang et al. [235], define que a visibilidade e a rastreabilidade em tempo real em todo o processo de produção é possível, graças à IoT. Esta competência é crucial para melhorar a eficiência operacional global, simplificar os procedimentos de produção e tomar decisões bem informadas no chão de fábrica. A IoT na I4.0 oferece um apoio substancial ao paradigma de Gestão em Tempo Real. Permite correções rápidas de problemas, aumenta a produtividade e diminui o tempo de inatividade. Quando aliada a simulação e realidade virtual, o planejamento e a otimização são melhorados em cenários que reduzem os erros e aumentam a produção [228]. Wu et al. [234], aponta que integração da IoT com modelos avançados de *Machine Learning* é essencial para criar sistemas inteligentes e adaptativos no paradigma de Gestão em Tempo Real. Permite que os CPS se sincronizem sem problemas e facilita o rastreamento exato de recursos num ambiente de produção. Esta flexibilidade garante que a precisão do sistema se mantenha elevada ao longo do tempo, mesmo que as circunstâncias industriais se alterem.

Para utilizar integralmente as enormes quantidades de dados produzidos por dispositivos ligados em rede no chão de fábrica, a IoT deve ser integrada com a *Big Data* e a sua análise. O processamento de dados em tempo real é possível graças a esta integração, que é essencial para a tomada de decisões rápidas e bem informadas num ambiente industrial competitivo e dinâmico. A análise de *Big Data* ajuda os planos de manutenção preventiva que reduzem o tempo de inatividade e aumentam a vida útil do equipamento, ao prever quaisquer problemas antes de estes surgirem. É crucial para converter dados complexos em informações acionáveis. Ajudam a tomada de decisões ao oferecerem representações claras dos dados em tempo real, permitindo decisões mais informadas e estratégicas [236].

Além disso, a utilização de *Digital Twins* permite a produção de réplicas virtuais de ativos reais no âmbito da produção. Estes modelos digitais permitem a monitorização, a análise e a otimização dos processos em tempo real, o que resulta numa tomada de decisões mais informada e numa melhor gestão dos recursos [234].

Assim no contexto da Gestão em Tempo Real, tecnologias como a IA, a *Machine Learning*, a CC, a *Edge Computing*, a *Big Data* e *Blockchain Technology* são cruciais. Permitem que a capacidade de processamento seja escalonada dinamicamente, que enormes volumes de dados sejam geridos em tempo real a partir de dispositivos heterogêneos e que as aplicações interajam sem problemas com ambientes inteligentes. A adoção destas tecnologias conduz a melhorias consideráveis nas dimensões social, ambiental e económica da sustentabilidade, em consonância com os princípios da I4.0 [229, 231].

Em suma, devido a análise realizada verifica-se quais são as tecnologias mais mencionadas na literatura e como estas influenciam as organizações contemporâneas. Especificamente, observou-se que tecnologias como a IA, *Big Data*, e IoT têm sido amplamente mencionadas, evidenciando sua relevância no cenário atual. Estas tecnologias influenciam as organizações ao promoverem inovações nos processos operacionais, facilitarem a tomada de decisões com base em dados e possibilitarem novos modelos de negócio, além de contribuírem para a melhoria da eficiência e competitividade das empresas.

5.4. Sinergia entre os Paradigmas de Gestão e a I4.0

O subcapítulo presente, analisa a sinergia dos paradigmas de gestão e da I4.0, através das contribuições dos artigos tendo em conta os princípios da I4.0 e como eles se relacionam com os paradigmas de gestão. Posteriormente, é feita uma análise de sinergia recorrendo-se ao software VOSviewer, para interpretação de diferentes mapas de *keywords*, de forma a avaliar a relação da I4.0 e dos paradigmas de gestão abordados. Também são identificados termos de sobreposição e o que significa para o tópico em questão.

A integração da Gestão *Lean* e da I4.0 pode ser vista como passos evolutivos complementares. A Gestão *Lean* está naturalmente correlacionada com os objetivos da I4.0, que salienta a eficiência, a personalização e a integração da tecnologia digital. Baseia-se nas ideias de redução de resíduos, melhoria contínua e criação de valor [198]. A I4.0 e a Gestão *Lean* não são apenas compatíveis, mas podem reforçar-se significativamente quando implementadas em conjunto [15, 205, 207]. De uma perspetiva sinérgica, a integração da I4.0 e da Gestão *Lean* representa uma abordagem estratégica para melhorar a eficiência e a competitividade da produção [199]. A forma como I4.0 pode aumentar a eficácia dos métodos *Lean* é onde reside a sinergia entre os dois paradigmas. O *Lean* tenta remover componentes essenciais de desperdício, como defeitos e tempo de inatividade. A monitorização em tempo real e a análise preditiva da I4.0, por exemplo, podem reduzi-los significativamente [200].

Nedjwa et al. [206], através de uma análise bibliométrica destaca uma série de sinergias importantes entre a I4.0 e as técnicas *Lean*. Por exemplo, a recolha e análise de dados em tempo real é possível através da combinação da análise de *Big Data* com tecnologias *Lean*, como a Manutenção Produtiva Total e o Mapeamento do Fluxo de Valor. Do mesmo modo, os tempos de espera e o desperdício podem ser minimizados através da automatização da gestão do inventário e da programação da produção com a utilização de técnicas *Lean* como o *Kanban* e o *Just-In-Time* em conjunto com a IoT e os CPS. Mas, garantir que a adoção da tecnologia da I4.0 adere aos conceitos da Gestão *Lean* é um grande problema. Se as tecnologias sofisticadas não forem cuidadosamente alinhadas, podem complicar os processos em vez de os simplificar, o que pode resultar em ineficiências em vez de benefícios [189]. Além disso Bueno et al. [209], identifica 15 fatores sinérgicos que demonstram como a tecnologia da I4.0 e os princípios *Lean* podem ser utilizados para produzir um sistema de produção mais reativo e eficiente. Por exemplo, conectar *Kanban* com IoT para e-*Kanban* e integrar *Kanban* com CPS para sistemas autónomos. Enquanto o Mapa de Fluxo de Valor associado ao CPS e ao CC aumenta a rastreabilidade, o *Poka-yoke* com *Machine Learning* melhora a previsibilidade.

Qi et al. [213] de um ponto de vista de sinergia, enfatiza que as técnicas *Lean* podem apoiar o crescimento da servitização. A excelência operacional é uma pré-condição crucial para a servitização efetiva de uma empresa, e as abordagens *Lean* enfatizam a redução de desperdícios, a eficiência e a eliminação de operações que não acrescentam valor. Também não revela quaisquer provas de uma influência direta importante dos métodos *Lean* na servitização. Pelo contrário, os métodos *Lean* melhoram sobretudo a capacidade de inovação dos produtos, o que contribui para a transição para um modelo empresarial baseado nos serviços.

Tortorella et al. [207], salienta que a natureza modular e adaptável da I4.0 é particularmente adequada para complementar a Gestão *Lean*, que se centra na redução de resíduos, na melhoria contínua e na criação de valor na perspetiva do cliente. Além disso, a padronização e a interoperabilidade são elementos críticos da interface, pois permitem que diversos sistemas e dispositivos comuniquem eficazmente. Esta capacidade é fundamental para estabelecer um ambiente de produção modular e adaptável, pois permite uma integração e cooperação harmoniosas entre múltiplos componentes. É destacado também que o princípio da minimização do desperdício deve ser implementado antes da virtualização para garantir a manutenção de padrões de dados consistentes para os componentes de processamento [29]. Varela et al. [202] sugerem que, embora exista uma correlação entre a I4.0 e a sustentabilidade, não há provas claras que liguem os métodos *Lean* ao requisito de *Ecodesign*.

Assim, o facto de a I4.0 e a Gestão *Lean* terem como objetivo a otimização dos processos é uma das suas principais “sinergias”. A recolha e análise de dados em tempo real são possíveis graças às tecnologias da I4.0, o que pode melhorar significativamente a capacidade do *Lean* para encontrar e eliminar desperdícios [198].

A sinergia entre a Gestão Ágil e os conceitos da I4.0 encontra-se no seu foco mútuo na adaptabilidade e na capacidade de resposta. Equipas multifuncionais, ciclos de feedback contínuos, desenvolvimento iterativo e outras abordagens ágeis são ideais para utilizar os dados em tempo real e as capacidades adaptáveis oferecidas pela tecnologia da I4.0 [197]. A agilidade, que é realçada na resiliência e na sustentabilidade, é mais do que simplesmente velocidade e adaptabilidade, trata-se de incorporar resiliência nos sistemas industriais para que possam resistir a eventos imprevistos e interrupções. Isto é possível graças à I4.0, que monitorizam e otimizam continuamente as operações, e permite às empresas reagir rapidamente às mudanças no mercado [218]. A sinergia também se verifica aquando da integração destes dois paradigmas. Organizações flexíveis e resilientes, preveem e reagem eficazmente a perturbações, uma gestão de risco facilitada por estes paradigmas [216].

Rauch et al. [217], afirma que o princípio de modularidade da I4.0 se alinha com o Agile e permite flexibilidade. Assim é possível desenvolver sistemas de produção que são escaláveis, resistentes a perturbações e extremamente adaptáveis a alterações nas necessidades dos clientes e na conceção dos produtos. Congruentemente Moghaddam & Nof [193], a manufatura descentralizada utiliza a modularização e a orientação para os serviços para criar um ambiente de produção flexível e ágil. Ao modularizar componentes e serviços, é permitido que as empresas reconfigurem rapidamente as operações para responder às exigências em constante mudança, o que é consistente com as ideias-chave da Gestão Ágil.

Qi et al. [213], defende que a Gestão Ágil se alinha com os princípios da I4.0, que incluem a interoperabilidade, a virtualização, a descentralização, a capacidade em tempo real, a orientação para os serviços e a modularidade. Salienta que ambos os paradigmas têm uma sinergia que é particularmente significativa quando se trata do seu impacto na servitização. Os processos ágeis têm pouca influência direta na servitização, porém desempenham um papel indireto importante no reforço das capacidades de inovação dos produtos. Também sugere que, a personalização em massa é crucial para melhorar a inovação dos produtos, proporcionando a flexibilidade necessária para satisfazer as diversas exigências dos clientes.

Embora não conduza diretamente à servitização, apoia a transição para modelos orientados para os serviços, com as tecnologias da I4.0 a permitirem uma produção eficiente e em grande escala de produtos personalizados. Tronvoll et al. [219], aponta que o *Agile* associado da I4.0 permitem que as organizações se adaptem rapidamente às exigências dinâmicas da prestação de serviços digitais. Apoiam a transição para a servitização, e facilitam o fornecimento de serviços digitais que complementem, ou substituam, os produtos tradicionais.

Yli-Ojanperä et al. [197], afirma que é necessário um desenvolvimento contínuo para normalizar a interoperabilidade entre as tecnologias de vários fornecedores e para permitir operações comerciais executáveis entre organizações ligadas em rede em termos de comunicação e troca de informações num mundo conectado.

Com a sua ênfase na adaptabilidade, pensamento rápido e procedimentos iterativos, a Gestão Ágil complementa muito bem os pontos fortes da I4.0. Quando combinados, fornecem uma estrutura que tira o máximo partido destes desenvolvimentos técnicos num mercado em mudança. A descentralização, a virtualização e a orientação para os serviços são necessidades que este dinamismo ajuda a equipa de desenvolvimento de produtos a satisfazer com êxito [213].

O paradigma da Gestão Colaborativa e os princípios da I4.0, como a automatização, a comunicação semântica e a interoperabilidade, estão fortemente relacionados entre si [226]. A conectividade digital da I4.0 contribui significativamente para o paradigma da Gestão Colaborativa, ao incentivar a transparência, a confiança e a cooperação entre as empresas e os seus clientes. A troca de dados em tempo real é possível graças a esta conectividade e é essencial para a co-criação de valor e para a adaptação de soluções. A conectividade digital facilita a troca de dados e os processos de tomada de decisão mais eficazes, o que aumenta ainda mais a sinergia entre os vários intervenientes na cadeia de abastecimento. Esta ligação facilita a criação de soluções personalizadas e integradas [227]. A incorporação das ideias da I4.0 na colaboração melhora a capacidade das equipas remotas para trabalharem em conjunto com mais sucesso, independentemente da sua localização [220]. Assim, esta integração reforça o paradigma da Gestão Colaborativa e permite a coordenação e a interação sem descontinuidades de recursos de fabrico distribuídos [222].

Krishnamurthy & Cecil [220] apontam que, o design modular da I4.0 através de uma estrutura CPS baseada na IoT, leva a tomada de decisões descentralizada, o que permite que cada componente realize determinadas tarefas enquanto apoia os objetivos do sistema como um todo. Amplifica os impactos sinérgicos da Gestão Colaborativa e possibilita que equipas díspares se concentrem nas suas respetivas responsabilidades, ao preservar uma perspetiva integrada de todo o processo de produção. Moghaddam & Nof [193] enfatiza a forma como a produção distribuída é um importante facilitador da orientação para os serviços e da modularização, que inclui a partilha de recursos e serviços de fabrico entre uma rede de empresas. Esta estratégia está em conformidade com o princípio fundamental de descentralização da I4.0 e possibilita uma tomada de decisão mais adaptável e independente dentro da rede cooperativa. A abordagem de modularização complementa o foco da I4.0 na escalabilidade e adaptabilidade, permitindo que a rede colaborativa se desenvolva e cresça sem a necessidade de reconstruir todo o sistema [224].

A Indústria 4.0 promove a tomada de decisões descentralizada, na qual os robôs e os sistemas autônomos trabalham em conjunto para maximizar os processos de produção. Assim sendo, a descentralização diminui a necessidade de gestão centralizada, em linha com as ideias colaborativas, resultando em operações mais fiáveis e eficazes [222].

Além disso, a I4.0 pode apoiar a Gestão Colaborativa, ao facilitar a interoperabilidade entre diferentes tipos de máquinas através do uso de protocolos de comunicação padronizados e a cooperação entre as fronteiras organizacionais é ainda mais incentivada. A interoperabilidade permite que o ecossistema trabalhe em conjunto sem problemas, independentemente da localização ou da tecnologia, o que é essencial para alcançar os benefícios da Gestão Colaborativa [222]. A melhoria da interoperabilidade é um exemplo de como a I4.0 pode facilitar a comunicação e a troca de dados entre sistemas e organizações diferentes. Uma vez que a interoperabilidade garante que sistemas díspares possam funcionar em conjunto de forma eficaz e sem problemas de incompatibilidade, é essencial para facilitar a colaboração bem-sucedida entre as várias partes interessadas numa rede de fabrico [224].

Assim, o paradigma de Gestão Colaborativa alinha as entidades em torno de objetivos comuns de sustentabilidade e promove um ecossistema resiliente e adaptável, essencial para enfrentar os desafios modernos.

As ideias fundamentais da I4.0 implicam uma relação estreita entre o paradigma de Gestão em Tempo Real [232]. A tomada de decisões e as competências de processamento de dados em tempo real são essenciais para o ambiente dinâmico e interligado dos dois paradigmas. A combinação de grandes volumes de dados, computação em nuvem e inteligência artificial da I4.0 apoiam a exigência de análises em tempo real, o que permite uma tomada de decisões mais rápida e informada [229]. A sinergia entre a I4.0 e a Gestão em Tempo Real é demonstrada pela forma como as tecnologias de grandes volumes de dados são integradas com estruturas de processamento em tempo real. Ao assegurar um fluxo de informação fluido desde a recolha de dados até à análise em tempo real, esta interface permite basear as escolhas de manutenção nos dados mais recentes [230].

Sollfrank et al. [233], destaca que a virtualização sob o paradigma de Gestão em Tempo Real da I4.0 tem vários benefícios. Enfatiza a necessidade de sistemas adaptáveis, escaláveis e interoperáveis, nos quais vários componentes podem interagir suavemente em tempo real para otimizar as operações. Também refere que, a Gestão em Tempo Real suporta a modularidade, a escalabilidade e a eficiência exigidas pela I4.0 e que para satisfazer as exigências da descentralização, a abordagem de gestão também tem de facilitar a partilha de recursos, conhecimentos e dados entre as pessoas.

Zeng et al. [237], afirma que o controlo centralizado dos recursos de rede e a atribuição dinâmica de intervalos de tempo com base nas exigências em tempo real, o sistema pode adaptar-se a cargas de rede e requisitos operacionais variáveis sem sacrificar o desempenho. Esta adaptabilidade representa uma sinergia fundamental entre a Gestão em Tempo Real e os princípios da I4.0.

Seguidamente, para melhor ilustrar a interação entre as abordagens de gestão e a I4.0, foi realizada uma análise de quatro mapas de *keywords*, cada um referente a cada paradigma, de

forma a compreender a sinergia e as relações entre a I4.0 e os paradigmas de gestão. Recorreu-se ao software VOSviewer para a efetuação da análise presente neste subcapítulo. A análise é decorrida do conjunto de artigos resultante da RSL.

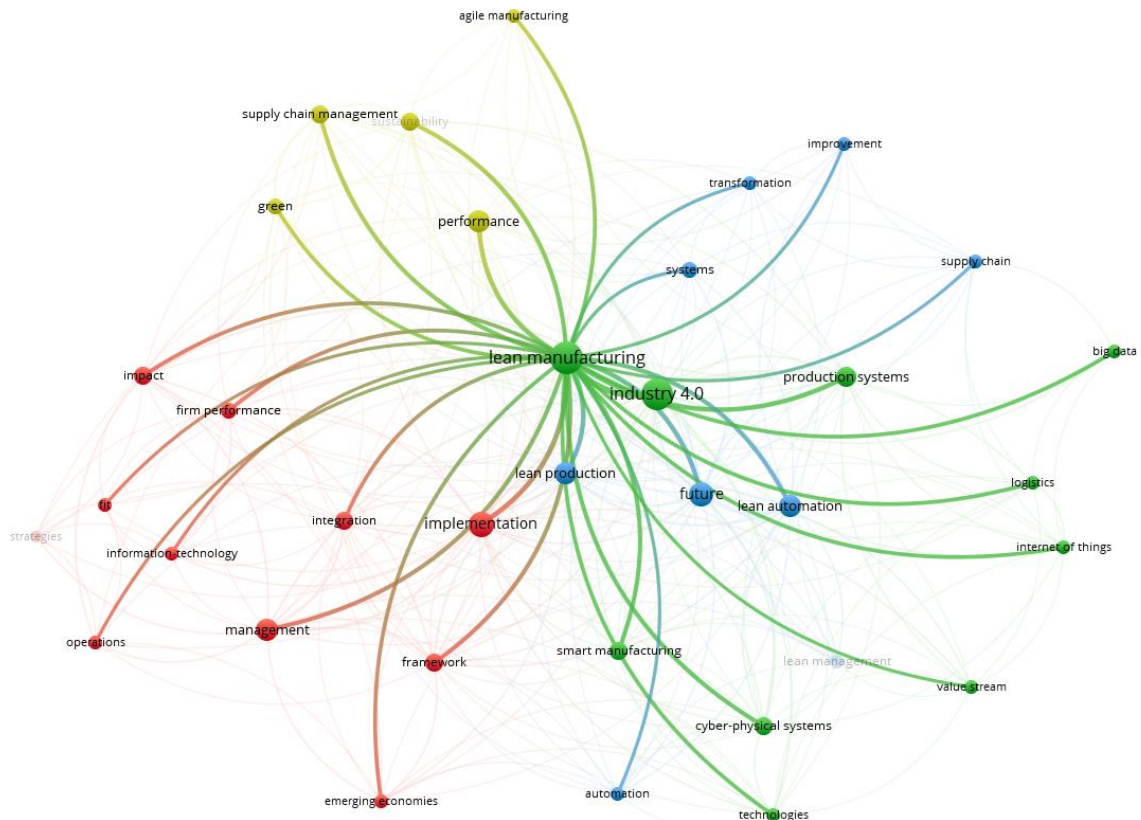


Figura 15 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, em relação a Gestão *Lean* e I4.0

A Figura 15 apresenta uma representação visual completa das ligações complexas entre a I4.0 e a Gestão *Lean*. Este mapa realça a forma como estas ideias estão entrelaçadas e a mudar em conjunto no contexto de produção contemporâneo. Os dois conceitos no centro do mapa são o “*Lean Manufacturing*” e a “*Indústria 4.0*”, que servem como polos em torno dos quais se centram outros conceitos relacionados. Esta localização no centro ilustra a importância destas ideias na determinação das técnicas de produção modernas. É demonstrado que a I4.0, está intimamente relacionada com a produção otimizada, que historicamente tem colocado uma forte ênfase na eficiência e na redução de resíduos. A combinação destas duas ideias sugere uma mudança na aplicação dos princípios *Lean*, que são agora apoiados por tecnologias de ponta como a automação, o *Smart Manufacturing* e os CPS. Estas tecnologias impulsionam o sector para uma maior produtividade, sustentabilidade e inovação, para além de apoiarem as técnicas *Lean*. Os tópicos centrais são rodeados por *clusters* de palavras-chave relacionadas que abordam determinadas facetas desta relação. A utilização de sistemas inteligentes na implementação dos princípios *Lean* é destacada por um grupo, que contém conceitos como CPS, *Smart Manufacturing* e produção *Lean*. Este agrupamento demonstra como a tecnologia e a produção otimizada estão a unir-se para mudar o sector. Um segundo grande *cluster* enfatiza a gestão e a implementação, ao destacar a execução tática necessária para incorporar

eficazmente os conceitos *Lean* na I4.0. Isto implica que as vantagens do “*Lean Manufacturing*” num contexto de alta tecnologia dependem de uma gestão eficiente, nomeadamente no que diz respeito à incorporação das tecnologias de informação e à garantia de uma utilização harmoniosa dos métodos *Lean*. Além disso, o aspeto de visão de futuro da integração é indicado pelo mapa, que inclui frases como cadeia de abastecimento, futuro, progresso e transformação. Este *cluster* destaca a forma como a produção ainda está a evoluir para satisfazer as expectativas da I4.0. Está a ser impulsionado por avanços técnicos, melhoria contínua e modernização da gestão da cadeia de abastecimento. É um testemunho da determinação da indústria em mudar e prosperar numa altura em que o sucesso depende tanto da tecnologia como dos conceitos *Lean*. Também se verifica que “*Agile Manufacturing*” é uma das palavras mais recorrentes. Demonstra assim uma compatibilidade entre os paradigmas de Gestão *Lean* e Ágil, no contexto da I4.0.

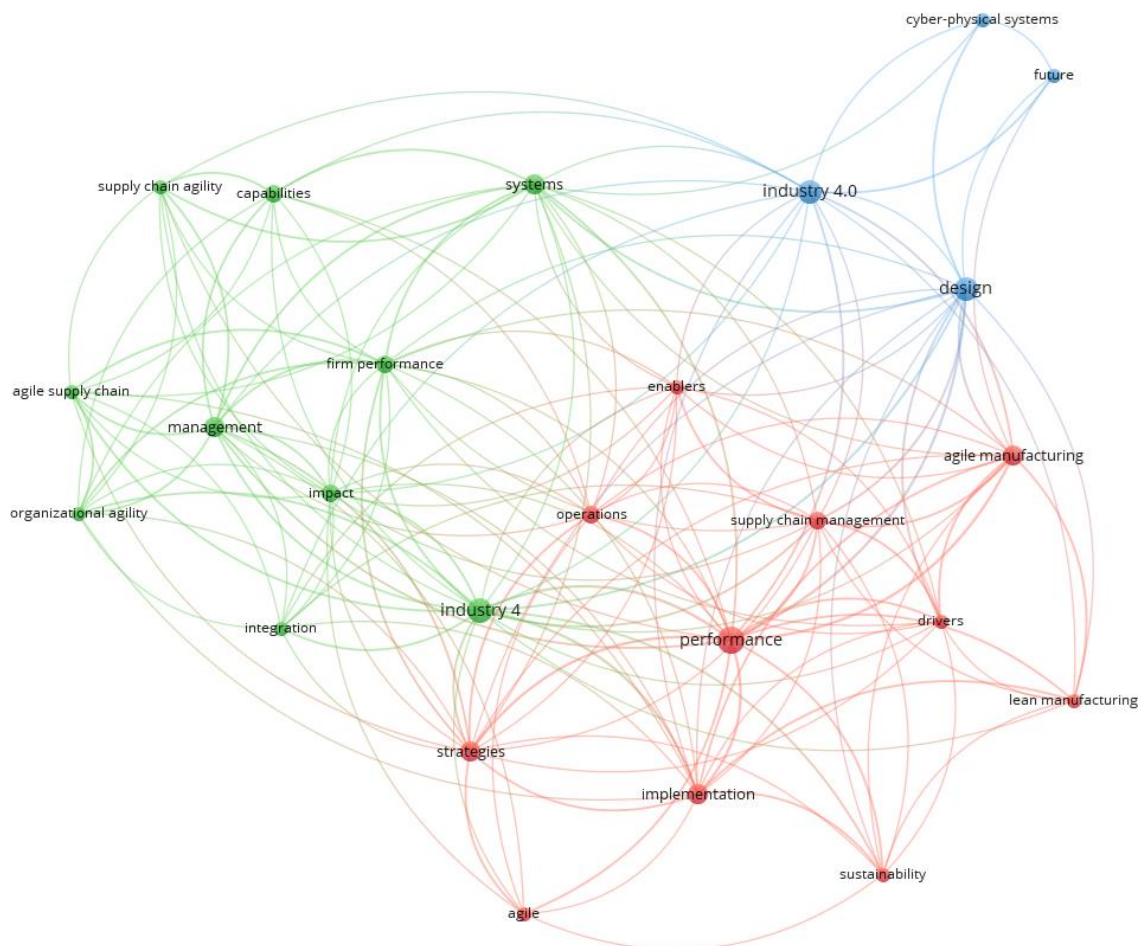


Figura 16 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, em relação a Gestão Ágil e I4.0

A análise da Figura 16 retrata com sucesso as ligações significativas entre o “*Agile Manufacturing*” e a I4.0, com a I4.0 a emergir como uma ideia central e proeminente. As semelhanças entre estes dois paradigmas são óbvias nas suas ligações mútuas a conceitos importantes como o desempenho, a gestão da cadeia de abastecimento e a implementação, todos fundamentais, para melhorar a eficiência e a flexibilidade operacionais. A correlação

entre a I4.0 e noções como CPS, design e o futuro sublinha a sua base na inovação tecnológica e em abordagens proactivas. Estes componentes são necessários para impulsionar o avanço das técnicas de produção. A I4.0 e a Gestão Ágil estão intimamente relacionados, especialmente no que diz respeito à gestão e desempenho da cadeia de abastecimento. Isto realça a forma como estão a trabalhar para objetivos semelhantes, como o aumento da eficiência operacional. A necessidade de técnicas de produção mais eficazes e sustentáveis parece ser uma das principais forças motrizes por detrás do impulso para a adoção da I4.0, como se pode ver pelas elevadas correlações observadas entre a Gestão Ágil e palavras-chave como “drivers”, sustentabilidade e Gestão *Lean*. A interação entre a I4.0 e o “*Agile Manufacturing*” exige os papéis de impacto, integração e gestão. A integração estratégica e a gestão eficiente são essenciais para o uso bem-sucedido dessas técnicas de produção inovadoras. Assim através de uma análise mais detalhada, o *cluster* verde, que se centra na agilidade da cadeia de abastecimento, nos sistemas, nas capacidades e no desempenho da empresa, mostra uma elevada correlação entre os efeitos das cadeias de abastecimento ágeis e das capacidades do sistema na gestão em geral e no desempenho da empresa em particular. A fim de alcançar um desempenho ótimo num ambiente dinâmico, salienta a importância da agilidade organizacional, da integração e da gestão. O *cluster* vermelho representa as relações entre a aplicação de práticas ágeis, abordagens estratégicas e o seu efeito no desempenho da produção. As responsabilidades da gestão da cadeia de abastecimento, dos condutores e da sustentabilidade também são destacadas neste grupo e demonstra como o nível de integração destes componentes em toda a estratégia afeta o desempenho. O *cluster* azul centra-se na conceção, na I4.0 e nas tecnologias emergentes, incluindo os CPS. As ligações deste *cluster* implicam que a I4.0 e as tecnologias relacionadas estão a ter impacto tanto nas operações atuais como nos planos e projetos futuros. Esta abordagem centrada no futuro destaca as formas como as novas tecnologias podem melhorar o desempenho e a agilidade.

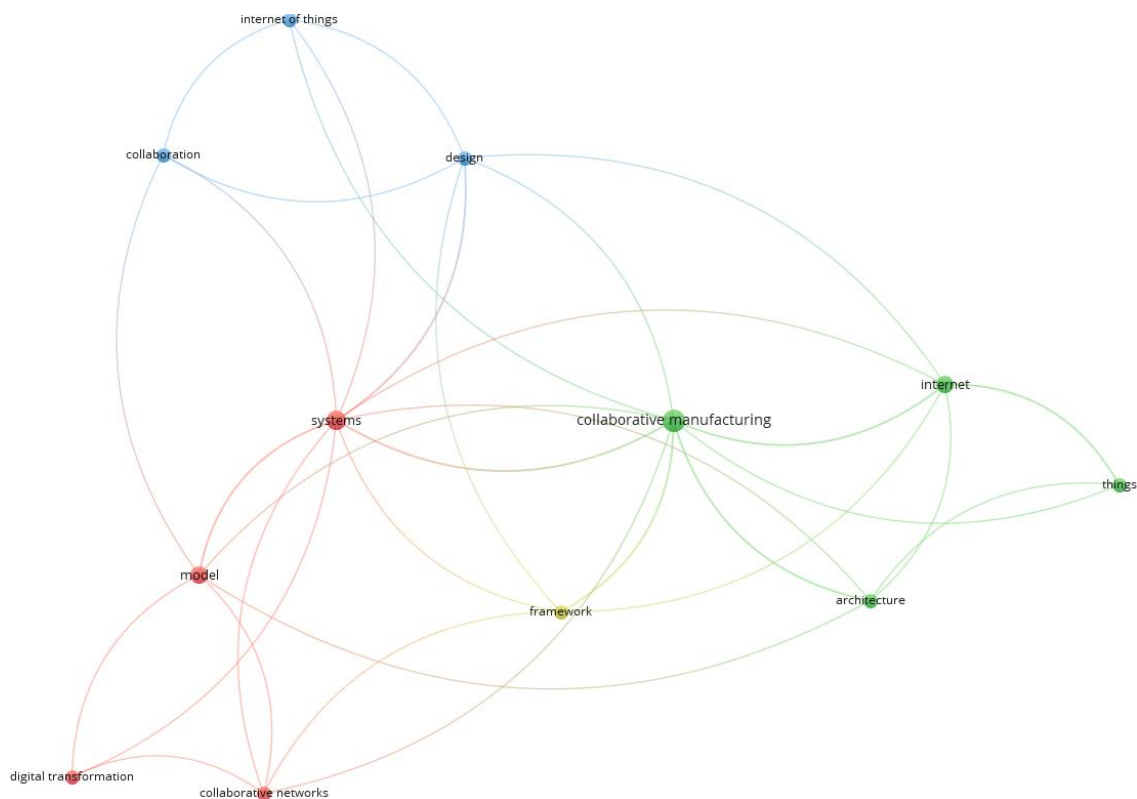


Figura 17 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, em relação a Gestão Colaborativa e I4.0

As ligações entre frases conectadas à Gestão Colaborativa e tópicos relacionados são visualmente representadas na Figura 17. O ponto focal é *“Collaborative Manufacturing”*, que está intimamente relacionado com *“things”*, *“architecture”*, *“internet”* e *“framework”*. Estas ligações realçam as formas como as estruturas digitais, os princípios de conceção arquitetónica e a IoT estão intimamente relacionados com o fabrico colaborativo, e destaca as formas como estas tecnologias trabalham em conjunto para facilitar a cooperação na produção. Como nó adicional importante, *“systems”* está ligado a *“Collaborative Manufacturing”* e *“model”*, bem como a ideias como *“collaborative networks”*, *“digital transformation”* e *“collaboration”*. Isto implica que o desenvolvimento e a operação de processos de fabrico colaborativo requerem uma forte abordagem de pensamento sistémico, com modelos teóricos e quadros organizados que orientam a sua execução. Os termos *“design”* e *“collaboration”* estão também associados a *“Collaborative Manufacturing”* e *“systems”* e sublinham a importância do pensamento de design e dos esforços de cooperação no sector de produção. As ligações acima mencionadas também englobam a *“Internet of Things”* e salientam a importância da conectividade e da tecnologia inteligente na promoção da cooperação no sector industrial. De notar que o termo *“Indústria 4.0”*, não se encontra presente. A situação pode acontecer devido aos artigos relacionados com Gestão Colaborativa se focarem mais nas tecnologias específicas da I4.0 e não nos conceitos gerais de gestão da mesma.

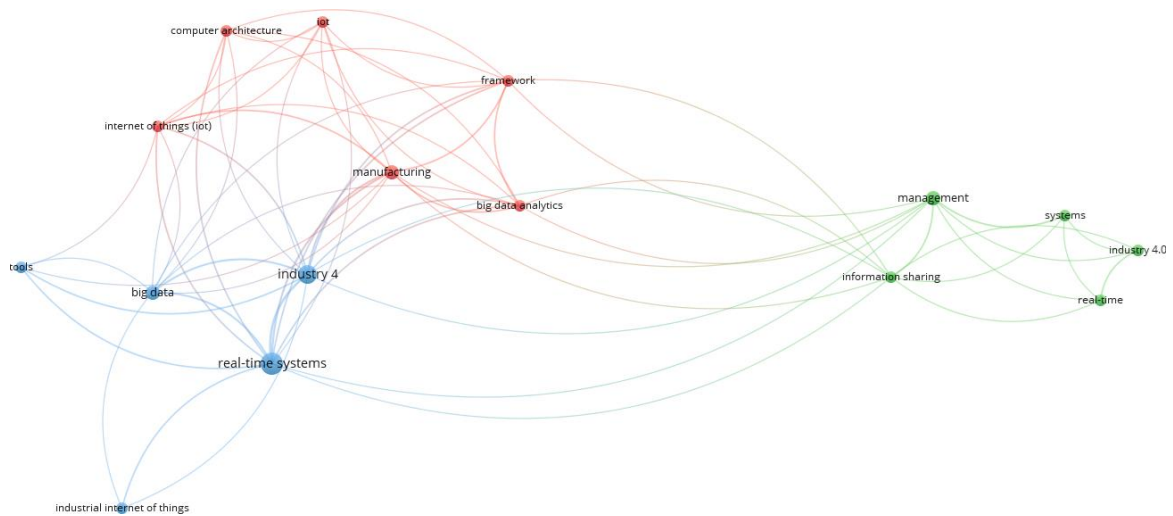


Figura 18 - Visualização em rede do mapa das palavras-chave mais usadas na literatura, em relação a Gestão em Tempo Real e I4.0

O mapa de palavras-chave, presente na Figura 18 apresenta as frases relacionadas com a I4.0 e tópicos relacionados. O conceito de “Indústria 4.0” funciona como um centro que liga muitas áreas, como “real-time systems”, “manufacturing”, “big data” e a “Internet of Things”. Estas ligações demonstram como estas tecnologias estão incluídas na estrutura mais alargada da I4.0. “Manufacturing” é um nó crucial que está associado a frases como “big data analytics”, “framework”, e “computer architecture”, que sugerem a infraestrutura técnica necessária para os procedimentos de fabrico contemporâneos. A importância do processamento de dados em tempo real e da comunicação em aplicações industriais é demonstrada pela forte relação entre os termos “real-time systems” e “big data” e “Internet Industrial of Things”. O mapa também destaca o papel crítico que a comunicação eficiente e a troca de dados desempenham nos sistemas da I4.0, ao enfatizar a necessidade de “management” e “information sharing” para integrar estas tecnologias. Assim, “real-time systems” são destacados no mapa como um componente-chave da I4.0, intimamente ligado a “big data”, “Internet of Things” e “Internet Industrial of Things”. De acordo com esta ligação, os sistemas em tempo real são necessários para processar e transferir instantaneamente dados entre diferentes plataformas e dispositivos. A sua função é essencial para facilitar a automatização e a capacidade de resposta necessárias nos ambientes industriais contemporâneos, ao garantir que os sistemas se podem ajustar rapidamente às mudanças e continuar a funcionar de forma eficiente.

De notar que os mapas de palavras-chave da Gestão Colaborativa e Gestão em Tempo Real, apresentam menos termos devido a apresentar um menor conjunto de artigos derivado da RSL realizada.

Com a análise de todos os mapas, verifica-se que surgem padrões comuns entre os diferentes mapas de palavras-chave, especialmente em relação aos três tópicos principais de cada mapa: produção, I4.0 e integração tecnológica. A “Indústria 4.0” é um componente-chave da estratégia industrial contemporânea, como evidenciado pelo seu aparecimento frequente como um dos principais centros associados a termos como “Lean Manufacturing”, “Agile Manufacturing”, “Collaborative Manufacturing” e “Real-Time Systems”. O termo “Collaborative

Manufacturing”, que está frequentemente associado a “*framework*”, “*architecture*”, “*systems*” e “*Internet of Things*”, sugere que a produção moderna está a tornar-se cada vez mais dependente de sistemas em rede. A sobreposição entre “*Lean Manufacturing*” e “*digital transformation*”, que enfatiza a integração de princípios *Lean* com tecnologia digital para aumentar a eficiência e minimizar o desperdício, destaca ainda mais essa colaboração entre diversas plataformas e processos. As referências recorrentes à “*Internet of Things*” e ao “*big data*”, particularmente em relação à I4.0 e aos sistemas em tempo real, indicam a importância crescente da análise de dados e dos dispositivos em rede para facilitar a tomada de decisões em tempo real e simplificar as operações industriais. As ligações entre “*framework*”, “*management*” e “*implementation*” em cada um destes mapas também realçam a necessidade de métodos organizados para adotar estas tecnologias e processos e garantir a sua integração estratégica e bem-sucedida nos sistemas atuais.

Em conclusão, as palavras-chave sobrepostas destes mapas realçam a forma como as atuais estratégias de produção, que combinam a I4.0, a IoT, os paradigmas de gestão e a análise de dados para criar um ambiente de produção mais reativo e integrado, estão inter-relacionadas, suportando sinergia entre eles. Estas sobreposições mostram como é importante ter quadros de gestão coerentes para aplicar corretamente estas técnicas e tecnologias.

5.5. Gaps da Literatura

Apesar de ter sido avaliado os paradigmas de gestão no contexto da I4.0 em variados aspetos, a literatura ainda apresenta lacunas que uma futura investigação pode procurar responder. Neste subcapítulo, são abordadas lacunas presentes na atual literatura.

Primeiramente, a falta de investigação empírica comparativa que examine os efeitos da aplicação simultânea de vários paradigmas de gestão como o *Lean*, o *Agile*, o Colaborativo e o Tempo Real, em vários sectores industriais é uma das principais lacunas encontradas. A maior parte da investigação realizada centra-se em estudos de casos particulares ou simulações, que não oferecem uma forte perspetiva comparativa entre diferentes sectores e circunstâncias económicas. São também necessários estudos longitudinais para investigar de que forma esta integração pode afetar as operações e o desempenho organizacional a longo prazo.

Embora a integração de vários paradigmas de gestão com a tecnologia da I4.0 tenha sido amplamente discutida, a investigação sobre os impactos sinérgicos desta integração é escassa. Poucos trabalhos analisam como podem ser integrados para promover vantagens mútuas, minimizando possíveis conflitos. Não existem modelos teóricos ou empíricos na literatura que aprofundem esta sinergia. Igualmente, a maioria dos estudos aborda cada paradigma isoladamente ou em pares, sem ter em conta uma integração abrangente que permita uma sinergia total entre estes vários métodos de gestão. Esta abordagem fragmentada limita a capacidade das empresas de desenvolverem uma estratégia verdadeiramente integrada que maximize a eficiência operacional em todas as áreas.

No que diz respeito aos blocos de estudo, contrariamente com a Gestão *Lean*, os restantes paradigmas necessitam de mais clarificação e abundância de publicações. Não existem suficientes *frameworks* na literatura sobre formas de como a Gestão Ágil e Gestão Colaborativa

podem ser combinadas com a I4.0. A investigação limita-se a fornecer uma análise superficial de possíveis relações, sendo assim, necessário mais especificidade nessa área. Relativamente, à Gestão em Tempo Real, a investigação referente a esta área terá de ser redirecionada para um caminho muito mais específico, do ponto de vista de gestão. Vista de um prisma geral, este paradigma de gestão aparenta apresentar uma grande quantidade de informação no contexto da I4.0. Porém, a maioria dos artigos relatam a forma de como os dados foram extraídos e tratados, através *frameworks* muito específicos, que não são aplicáveis à maior parte dos casos. Focam-se muito no aspeto técnico dos tratamentos de dados e como executá-lo (por exemplo, criação de algoritmos, definição de meta-heurísticas, *Machine Learning*) e pouco no aspeto dos conceitos de gestão e como a I4.0 poderia ajudar nas tomadas de decisões e ser integrada.

A integração da tecnologia da I4.0 com princípios de gestão sustentável não tem sido objeto de atenção suficiente. A literatura enfatiza frequentemente a importância da sustentabilidade, mas surpreendentemente poucos estudos investigam a forma como as práticas de gestão *Lean*, *Ágil*, *Colaborativa* e em Tempo Real podem estar em linha com os objetivos de sustentabilidade. É crucial fazer investigação que estabeleça uma ligação clara entre estas técnicas de gestão e resultados ambientais quantificáveis. Focalizar no princípio da I4.0 *Ecodesing*, pode levar a clareza relativamente a sustentabilidade.

Assim, as lacunas encontradas na literatura relativamente aos paradigmas de gestão no contexto da I4.0 realçam a necessidade de estudos adicionais que promovam a integração harmoniosa de vários paradigmas, resolvam conflitos entre os seus princípios e criem estratégias mais adequadas às condições do mundo industrial moderno. É necessário evidenciar sinergias entre os paradigmas de gestão e a I4.0 e a focar nos conceitos de gestão juntamente com as tecnologias da I4.0.

6. Conclusão

Neste capítulo é abordado as conclusões finais limitações do trabalho realizado, bem como sugestões para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões finais

Este estudo tornou clara a importância de integrar vários paradigmas de gestão, especificamente, Gestão *Lean*, Gestão Ágil, Gestão Colaborativa e Gestão em Tempo Real, no âmbito da I4.0. Quando combinados com as novas tecnologias I4.0, as qualidades distintivas de cada um destes paradigmas oferecem novas possibilidades de otimização de processos, ganhos de eficiência e estimulação da criatividade organizacional.

A análise da literatura mostrou que a combinação destas abordagens pode resultar numa estratégia flexível e adaptável, necessária para as empresas lidarem com as rápidas mudanças no ambiente empresarial moderno. Para fazer face à complexidade e ao dinamismo do atual panorama industrial, é necessário implementar uma estratégia integrada que tenha em conta as características únicas de cada paradigma de gestão no contexto da I4.0.

Através da avaliação dos resultados da dissertação, obtém-se novas informações sobre a forma como os paradigmas de gestão podem ser integrados no quadro da I4.0. Os resultados demonstram que, mesmo quando combinada com a tecnologia recentemente desenvolvida, a Gestão *Lean* continua a ser predominante e amplamente utilizada pelas empresas para aumentar a eficiência e minimizar o desperdício. Por outro lado, a Gestão Ágil destaca-se pela sua capacidade de promover a adaptabilidade e a rapidez de resposta às mudanças em curso no mercado, o que constitui uma qualidade essencial para as empresas que pretendem manter a sua competitividade. Embora menos comuns, a Gestão Colaborativa e a Gestão em Tempo Real são muito promissoras para melhorar a coordenação interna e externa das empresas e facilitar a tomada de decisões com base em dados em tempo real. No entanto, ainda não existem na literatura quadros robustos que expliquem como estas técnicas podem ser integradas com êxito nas tecnologias I4.0.

Também se comprova que, embora tenha havido um progresso significativo na integração dos paradigmas de gestão com a I4.0, é necessária mais investigação para realizar plenamente o potencial desta sinergia, devido a lacunas na literatura. A investigação futura deve concentrar-se na criação de quadros específicos que combinem estas abordagens de uma forma mais

coerente e útil, satisfazendo as exigências das empresas contemporâneas num contexto cada vez mais dinâmico e digital.

A dissertação, em resumo, enfatiza a necessidade de uma abordagem de gestão integrada e holística, em que as tecnologias da I4.0 são combinadas com paradigmas de gestão para melhorar a eficiência operacional e impulsionar as organizações para a sustentabilidade e competitividade num mercado tecnologicamente avançado e exigente. As conclusões aqui apresentadas abrem novas vias de investigação e aplicações úteis que podem expandir grandemente a compreensão deste domínio em desenvolvimento.

6.2. Limitações e trabalhos futuros

A compreensão da fusão de paradigmas de gestão no quadro da I4.0, é imperativo reconhecer os seus constrangimentos particulares. Em primeiro lugar, a abordagem metodológica, que se baseia numa Revisão Sistemática da Literatura (RSL), pode deixar de fora trabalhos pertinentes que tenham sido publicadas em diferentes meios ou línguas, uma vez que se restringe aos dados encontrados nas bases de dados escolhidas. Além disso, a complexidade das relações entre as tecnologias da I4.0 e os paradigmas de gestão levanta a possibilidade de certas subtilezas e fatores contextuais que afetam esta integração não terem sido incluídos na investigação. A ausência de suporte empírico para os resultados obtidos é outra limitação. Embora a pesquisa teórica e a revisão da literatura forneçam uma compreensão completa das sinergias e dificuldades, esta dissertação não abordou como essas ideias podem ser usadas em ambientes industriais reais. O sucesso das soluções de integração mencionadas pode ser muito influenciado por fatores organizacionais e setoriais, o que limita a generalização dos resultados.

Também é importante referir a superficialidade que a maior parte dos artigos apresenta quando abordado os paradigmas de gestão com a I4.0. É necessário uma maior especificidade e aprofundamento nesta área de investigação para uma melhor clareza relativamente à literatura.

Quanto a trabalhos futuros, focar no desenvolvimento de *frameworks* para os paradigmas de gestão no contexto da I4.0. Futuros trabalhos devem focar no desenvolvimento de estruturas práticas que facilitem a adoção de paradigmas de gestão combinados com tecnologias da I4.0 para todo o tipo de empresas. Devem considerar as limitações típicas das organizações, como restrições de orçamento, falta de mão de obra especializada e infraestrutura tecnológica limitada, e fornecer soluções viáveis e adaptáveis. Ao adotar tecnologias avançadas de maneira crescente, é imprescindível examinar os impactos sociais e éticos dessas transformações. Trabalhos futuros devem se concentrar em como a transformação digital afetará a mão de obra, tendo em consideração questões como requalificação de trabalhadores, transições de emprego e gerenciamento de mudanças organizacionais. Além disso, estudos de pesquisa que analisam as implicações éticas do uso dessas tecnologias em vários contextos culturais e sociais podem apoiar um desenvolvimento mais sustentável e responsável da I4.0.

Referências

- [1] T. Clarke and S. Clegg, "Management paradigms for the new millennium," *International Journal of Management Reviews*, vol. 2, no. 1, pp. 45–64, Mar. 2000, doi: 10.1111/1468-2370.00030.
- [2] M. Ghobakhloo, "Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability," *J Clean Prod*, vol. 252, p. 119869, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119869.
- [3] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*. 2017. [Online]. Available: www.weforum.org
- [4] J. Kadarova and M. Demecko, "New Approaches in Lean Management," *Procedia Economics and Finance*, vol. 39, pp. 11–16, 2016, doi: 10.1016/s2212-5671(16)30234-9.
- [5] A. Gunasekaran, Y. Y. Yusuf, E. O. Adeleye, T. Papadopoulos, D. Kovvuri, and D. G. Geyi, "Agile manufacturing: an evolutionary review of practices," 2019, *Taylor and Francis Ltd*. doi: 10.1080/00207543.2018.1530478.
- [6] L. R. Varela, J. Trojanowska, M. M. Cruz-Cunha, M. Â. Pereira, G. D. Putnik, and J. M. Machado, "Global Resources Management: A Systematic Review and Framework Proposal for Collaborative Management of CPPS," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 2, p. 750, Jan. 2023, doi: 10.3390/app13020750.
- [7] G. Putnik, C. Alves, P. Ávila, L. Ferreira, H. Castro, and V. Shah, "A Framework for simulator development for Fixed Horizon, Rolling Horizon and Real Time Management Modelling and Evaluation," in *Proceedings of 2100 Projects Association Join Conferences 3*, 2100 Projects Association, 2015, pp. 81–88. doi: 10.26537/recipp-23133.
- [8] M. N. K. Saunders, P. Lewis, and A. Thornhill, *Research Methods For Business Students*, 8th ed. Pearson, 2019.
- [9] A. Melnikovas, "Towards an explicit research methodology: Adapting research onion model for futures studies," *Journal of Futures Studies*, vol. 23, no. 2, pp. 29–44, 2018, doi: 10.6531/JFS.201812_23(2).0003.
- [10] S. Jalali and C. Wohlin, "Systematic literature studies," in *Proceedings of the ACM-IEEE international symposium on Empirical software engineering and measurement*, New York, NY, USA: ACM, Sep. 2012, pp. 29–38. doi: 10.1145/2372251.2372257.
- [11] L. Varela, G. Putnik, and F. Romero, "The concept of collaborative engineering: a systematic literature review," *Prod Manuf Res*, vol. 10, no. 1, pp. 784–839, Dec. 2022, doi: 10.1080/21693277.2022.2133856.
- [12] M. G. Filho, F. Cesar, and F. Fernandes, "Strategic Paradigms for Manufacturing Management (Spm): Key Elements and Conceptual Model," 2009. doi: 10.23055/ijietap.2009.16.2.260.
- [13] J. Halbe, C. Pahl-Wostl, J. Sendzimir, and J. Adamowski, "Towards adaptive and integrated management paradigms to meet the challenges of water governance," *Water Science and Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 2651–2660, Jun. 2013, doi: 10.2166/wst.2013.146.
- [14] M. H. Safizadeh, L. P. Ritzman, and D. Mallick, "REVISITING ALTERNATIVE THEORETICAL PARADIGMS IN MANUFACTURING STRATEGY," *Prod Oper Manag*, vol. 9, no. 2, pp. 111–126, Jun. 2000, doi: 10.1111/j.1937-5956.2000.tb00328.x.
- [15] M. Sony, "Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions," *Prod Manuf Res*, vol. 6, no. 1, pp. 416–432, Jan. 2018, doi: 10.1080/21693277.2018.1540949.

- [16] T. Ohno, *Toyota Production System Beyond Large-Scale Production*, Original Japanese. Tokyo: Diamond Inc., 1978.
- [17] N. V. K. Jastia and R. Kodali, "Lean production: Literature review and trends," *Int J Prod Res*, vol. 53, no. 3, pp. 867–885, Feb. 2015, doi: 10.1080/00207543.2014.937508.
- [18] J. P. Womack and D. T. Jones, *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, Revised and Updated*, 2nd ed. Free Press, 2003.
- [19] F. E. Touriki, I. Benkhati, S. S. Kamble, A. Belhadi, and S. El fezazi, "An integrated smart, green, resilient, and lean manufacturing framework: A literature review and future research directions," Oct. 15, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128691.
- [20] D. Martins, L. Fonseca, P. Ávila, and J. Bastos, "Lean practices adoption in the portuguese industry," *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 14, no. 2, pp. 345–359, 2021, doi: 10.3926/jiem.3291.
- [21] G. Czifra, P. Szabó, M. Míkva, and J. Vaňová, "Lean Principles Application in the Automotive Industry," 2019.
- [22] M. Habibi Rad, M. Mojtahedi, and M. J. Ostwald, "The integration of lean and resilience paradigms: A systematic review identifying current and future research directions," Aug. 02, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/su13168893.
- [23] N. Kumar, S. Shahzeb Hasan, K. Srivastava, R. Akhtar, R. Kumar Yadav, and V. K. Choubey, "Lean manufacturing techniques and its implementation: A review," *Mater Today Proc*, vol. 64, pp. 1188–1192, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.481.
- [24] S. Rangrej and S. Vallabhbai, "Application of Lean Manufacturing Principles for Process Time Reduction-A Case of Conveyor Pulley Manufacturing," 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.4412.5281.
- [25] P. J. Martínez-Jurado and J. Moyano-Fuentes, "Lean management, supply chain management and sustainability: A literature review," *J Clean Prod*, vol. 85, pp. 134–150, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.09.042.
- [26] R. Shah and P. T. Ward, "Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance," *Journal of Operations Management*, vol. 21, no. 2, pp. 129–149, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0272-6963(02)00108-0.
- [27] A. Belhadi, F. E. Touriki, and S. El Fezazi, "Benefits of adopting lean production on green performance of SMEs: a case study," *Production Planning and Control*, vol. 29, no. 11, pp. 873–894, Aug. 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1490971.
- [28] L. Naciri, Z. Mouhib, M. Gallab, M. Nali, R. Abbou, and A. Kebe, "Lean and industry 4.0: A leading harmony," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2022, pp. 394–406. doi: 10.1016/j.procs.2022.01.238.
- [29] D. Kolberg, J. Knobloch, and D. Zühlke, "Towards a lean automation interface for workstations," *Int J Prod Res*, vol. 55, no. 10, pp. 2845–2856, May 2017, doi: 10.1080/00207543.2016.1223384.
- [30] N. Elafri, J. Tappert, B. Rose, and M. Yassine, "Lean 4.0: Synergies between Lean Management tools and Industry 4.0 technologies," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2022, pp. 2060–2066. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.011.
- [31] R. Bhamra *et al.*, "Is leagile still relevant? A review and research opportunities," 2021, *Routledge*. doi: 10.1080/14783363.2020.1750360.
- [32] K. J. Wu, M. L. Tseng, A. S. F. Chiu, and M. K. Lim, "Achieving competitive advantage through supply chain agility under uncertainty: A novel multi-criteria decision-making structure," *Int J Prod Econ*, vol. 190, pp. 96–107, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.08.027.
- [33] B. Ding, X. Ferràs Hernández, and N. Agell Jané, "Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.0 technologies: an

- integrative approach," *Production Planning and Control*, vol. 34, no. 5, pp. 442–458, 2023, doi: 10.1080/09537287.2021.1934587.
- [34] T. Žužek, J. Kušar, L. Rihar, and T. Berlec, "Agile-Concurrent hybrid: A framework for concurrent product development using Scrum," *Concurr Eng Res Appl*, vol. 28, no. 4, pp. 255–264, Dec. 2020, doi: 10.1177/1063293X20958541.
- [35] F. K. Y. Chan and J. Y. L. Thong, "Acceptance of agile methodologies: A critical review and conceptual framework," *Decis Support Syst*, vol. 46, no. 4, pp. 803–814, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.dss.2008.11.009.
- [36] T. Dingsøyr, S. Nerur, V. Balijepally, and N. B. Moe, "A decade of agile methodologies: Towards explaining agile software development," 2012, *Elsevier Inc.* doi: 10.1016/j.jss.2012.02.033.
- [37] K. Conboy, "Agility from first principles: Reconstructing the concept of agility in information systems development," *Information Systems Research*, vol. 20, no. 3, pp. 329–354, 2009, doi: 10.1287/isre.1090.0236.
- [38] A. C. Pacagnella and V. R. da Silva, "20 Years of the Agile Manifesto: A Literature Review on Agile Project Management," *Management and Production Engineering Review*, vol. 14, no. 2, pp. 37–48, Jun. 2023, doi: 10.24425/mper.2023.146021.
- [39] P. Serrador and J. K. Pinto, "Does Agile work? - A quantitative analysis of agile project success," *International Journal of Project Management*, vol. 33, no. 5, pp. 1040–1051, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.ijproman.2015.01.006.
- [40] P. de O. Santos and M. M. de Carvalho, "Exploring the challenges and benefits for scaling agile project management to large projects: a review," *Requir Eng*, vol. 27, no. 1, pp. 117–134, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00766-021-00363-3.
- [41] K. Beck *et al.*, "Manifesto for Agile Software Development," 2001.
- [42] S. Gupta and D. Gouttam, "Towards changing the paradigm of software development in software industries: An emergence of agile software development," in *2017 IEEE International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)*, IEEE, Aug. 2017, pp. 18–21. doi: 10.1109/ICSTM.2017.8089120.
- [43] S. Al-Saqqa, S. Sawalha, and H. Abdelnabi, "Agile software development: Methodologies and trends," *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 14, no. 11, pp. 246–270, 2020, doi: 10.3991/ijim.v14i11.13269.
- [44] A. López-Alcarria, A. Olivares-Vicente, and F. Poza-Vilches, "A systematic review of the use of Agile methodologies in education to foster sustainability competencies," May 01, 2019, *MDPI*. doi: 10.3390/su11102915.
- [45] Z. G. Hu, Q. Yuan, and X. Zhang, "Research on agile project management with scrum method," in *Proceedings - 2009 IITA International Conference on Services Science, Management and Engineering, SSME 2009*, 2009, pp. 26–29. doi: 10.1109/SSME.2009.136.
- [46] A. Srivastava, S. Bhardwaj, and S. Saraswat, "SCRUM model for agile methodology," in *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, IEEE, May 2017, pp. 864–869. doi: 10.1109/CCAA.2017.8229928.
- [47] M. Morandini, T. A. Coleti, E. Oliveira, and P. L. P. Corrêa, "Considerations about the efficiency and sufficiency of the utilization of the Scrum methodology: A survey for analyzing results for development teams," Feb. 01, 2021, *Elsevier Ireland Ltd.* doi: 10.1016/j.cosrev.2020.100314.
- [48] B. Mrugalska and J. Ahmed, "Organizational agility in industry 4.0: A systematic literature review," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 15, Aug. 2021, doi: 10.3390/su13158272.

- [49] H. Soltan and S. Mostafa, "Lean and Agile Performance Framework for Manufacturing Enterprises," *Procedia Manuf*, vol. 2, pp. 476–484, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.082.
- [50] R. Mason-Jones, B. Naylor, and D. R. Towill, "Lean, agile or leagile? Matching your supply chain to the marketplace," *Int J Prod Res*, vol. 38, no. 17, pp. 4061–4070, 2000, doi: 10.1080/00207540050204920.
- [51] L. M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh, N. Galeano, and A. Molina, "Collaborative networked organizations – Concepts and practice in manufacturing enterprises," *Comput Ind Eng*, vol. 57, no. 1, pp. 46–60, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.cie.2008.11.024.
- [52] L. Varela, G. Putnik, and F. Romero, "Collaborative manufacturing and management contextualization in the Industry 4.0 based on a systematic literature review," *International Journal of Management Science and Engineering Management*, pp. 1–18, Feb. 2023, doi: 10.1080/17509653.2023.2174200.
- [53] M. R. Firmansyah and Y. Amer, "A Review of Collaborative Manufacturing Network Models," *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, pp. 6–12, 2013, doi: 10.7763/IJMMM.2013.V1.2.
- [54] H. Noori and W. B. Lee, "Dispersed network manufacturing: adapting SMEs to compete on the global scale," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 17, no. 8, pp. 1022–1041, Dec. 2006, doi: 10.1108/17410380610707366.
- [55] M. McClellan, *Collaborative Manufacturing - Using Real-Time Information to Support the Supply Chain*. Florida: CRC Press LLC, 2003.
- [56] W. H. Quik, N. J. Wright, A. Rashid, and H. Herjanto, "Collaborative Network Learning in Manufacturing," *International Journal of Advanced Corporate Learning (IJAC)*, vol. 7, no. 4, p. 4, Dec. 2014, doi: 10.3991/ijac.v7i4.3753.
- [57] Lihui Wang, "Wise-ShopFloor: An Integrated Approach for Web-Based Collaborative Manufacturing," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 38, no. 4, pp. 562–573, Jul. 2008, doi: 10.1109/TSMCC.2008.923868.
- [58] N. Bilbao, D. del Pozo, J. M. Lopez, and I. Etxaniz, "The collaborative manufacturing approach," in *2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2004. INDIN '04. 2004*, IEEE, 2004, pp. 23–26. doi: 10.1109/INDIN.2004.1417296.
- [59] F. M. Guerrini and C. C. Pellegrinotti, "Reference model for collaborative management in the automotive industry," *Production Planning & Control*, vol. 27, no. 3, pp. 183–197, Feb. 2016, doi: 10.1080/09537287.2015.1091518.
- [60] M. Holweg, S. Disney, J. Holmström, and J. Småros, "Supply Chain Collaboration:," *European Management Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 170–181, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.emj.2005.02.008.
- [61] V. K. Manupati, G. D. Putnik, and M. L. R. Varela, *Smart and Sustainable Manufacturing Systems for Industry 4.0*. Boca Raton: CRC Press, 2022. doi: 10.1201/9781003123866.
- [62] J.-Q. Li, F. R. Yu, G. Deng, C. Luo, Z. Ming, and Q. Yan, "Industrial Internet: A Survey on the Enabling Technologies, Applications, and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1504–1526, Jul. 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2691349.
- [63] Cunji Zhang and X. Yao, "Innovation in Wisdom Manufacturing," in *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, IEEE, Nov. 2016, pp. 1–8. doi: 10.1109/GET.2016.7916702.
- [64] F. R. da S. Meireles, A. C. Azevedo, and J. M. G. Boaventura, "Open innovation and collaboration: A systematic literature review," *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 65, p. 101702, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jengtecman.2022.101702.

- [65] L. Varela, P. Ávila, H. Castro, G. D. Putnik, L. M. C. Fonseca, and L. Ferreira, "Manufacturing and Management Paradigms, Methods and Tools for Sustainable Industry 4.0-Oriented Manufacturing Systems," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1574, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031574.
- [66] C. Vila, D. Ugarte, J. Ríos, and J. V. Abellán, "Project-based collaborative engineering learning to develop Industry 4.0 skills within a PLM framework," *Procedia Manuf*, vol. 13, pp. 1269–1276, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.050.
- [67] J. B. S. Franca, A. F. S. Dias, and M. R. S. Borges, "Observations on collaboration in agile software development," in *2015 IEEE 19th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, IEEE, May 2015, pp. 147–152. doi: 10.1109/CSCWD.2015.7230949.
- [68] Y. Rao, P. Li, X. Shao, B. Wu, and B. Li, "A CORBA- and MAS-based architecture for agile collaborative manufacturing systems," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 19, no. 8, pp. 815–832, Dec. 2006, doi: 10.1080/09511920500399540.
- [69] Y. Zhang, P. Jiang, G. Huang, T. Qu, G. Zhou, and J. Hong, "RFID-enabled real-time manufacturing information tracking infrastructure for extended enterprises," *J Intell Manuf*, vol. 23, no. 6, pp. 2357–2366, Dec. 2012, doi: 10.1007/s10845-010-0475-3.
- [70] G. G. Vieira, M. L. R. Varela, G. D. Putnik, J. M. Machado, and J. Trojanowska, "Integrated Platform for Real-time Control and Production and Productivity Monitoring and Analysis," 2016. Accessed: Dec. 22, 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1822/50916>
- [71] A. Burns and I. J. Hayes, "A timeband framework for modelling real-time systems," *Real-Time Systems*, vol. 45, no. 1–2, pp. 106–142, Jun. 2010, doi: 10.1007/s11241-010-9094-5.
- [72] W. A. Halang, R. Gumzej, M. Colnaric, and M. Druzovec, "Measuring the Performance of Real-Time Systems," Jan. 2000. doi: 10.1023/A:1008102611034.
- [73] U. C. Chukwu and S. M. Mahajan, "Real-Time Management of Power Systems With V2G Facility for Smart-Grid Applications," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 558–566, Apr. 2014, doi: 10.1109/TSTE.2013.2273314.
- [74] W. N. Liu *et al.*, "RFID-enabled real-time production management system for Loncin motorcycle assembly line," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 25, no. 1, pp. 86–99, Jan. 2012, doi: 10.1080/0951192X.2010.523846.
- [75] G. Q. Huang, Y. Zhang, and P. Jiang, "RFID-based wireless manufacturing for real-time management of job shop WIP inventories," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, no. 7–8, pp. 752–764, Mar. 2008, doi: 10.1007/s00170-006-0897-4.
- [76] G. G. Vieira, M. L. R. Varela, G. D. Putnik, and J. Machado, "Intelligent Platform for Supervision and Production Activity Control in Real Time," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 0, Springer Heidelberg, 2018, pp. 151–159. doi: 10.1007/978-3-319-68619-6_15.
- [77] F. Costa, S. Genovesi, M. Borgese, A. Michel, F. A. Dicandia, and G. Manara, "A Review of RFID Sensors, the New Frontier of Internet of Things," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3138, Apr. 2021, doi: 10.3390/s21093138.
- [78] G. D. Putnik *et al.*, "SMART OBJECTS EMBEDDED PRODUCTION AND QUALITY MANAGEMENT FUNCTIONS," *International Journal for Quality Research*, vol. 9, no. 1, pp. 151–166, 2015, Accessed: Dec. 22, 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1822/50929>
- [79] W. Wang, H. Yang, Y. Zhang, and J. Xu, "IoT-enabled real-time energy efficiency optimisation method for energy-intensive manufacturing enterprises," *Int J Comput*

- Integr Manuf*, vol. 31, no. 4–5, pp. 362–379, Apr. 2018, doi: 10.1080/0951192X.2017.1337929.
- [80] A. Angelopoulos *et al.*, “Tackling Faults in the Industry 4.0 Era—A Survey of Machine-Learning Solutions and Key Aspects,” *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 109, Dec. 2019, doi: 10.3390/s20010109.
- [81] S. Vaidya, P. Ambad, and S. Bhosle, “Industry 4.0 – A Glimpse,” *Procedia Manuf*, vol. 20, pp. 233–238, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
- [82] Z. Suleiman, S. Shaikholla, D. Dikhanbayeva, E. Shehab, and A. Turkyilmaz, “Industry 4.0: Clustering of concepts and characteristics,” *Cogent Eng*, vol. 9, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1080/23311916.2022.2034264.
- [83] Y. Lu, “Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues,” *J Ind Inf Integr*, vol. 6, pp. 1–10, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.jii.2017.04.005.
- [84] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, and S. A. Gawankar, “Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 117, pp. 408–425, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.05.009.
- [85] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, “Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review,” *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.
- [86] G. Erboz, “How To Define Industry 4.0: Main Pillars Of Industry 4.0 How to Define Industry 4.0: The Main Pillars Of Industry 4.0 The concept of Industry 4.0 has gained great importance in recent years. The increase in usage,” Accessed: Nov 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/326557388>
- [87] A. C. Pereira and F. Romero, “A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept,” *Procedia Manuf*, vol. 13, pp. 1206–1214, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.032.
- [88] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, “Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios,” in *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, IEEE, Jan. 2016, pp. 3928–3937. doi: 10.1109/HICSS.2016.488.
- [89] D. Cemernek, H. Gursch, and R. Kern, “Big data as a promoter of industry 4.0: Lessons of the semiconductor industry,” in *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, Jul. 2017, pp. 239–244. doi: 10.1109/INDIN.2017.8104778.
- [90] A. Issa, B. Hatiboglu, A. Bildstein, and T. Bauernhansl, “Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment,” *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 973–978, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.151.
- [91] Maskuriy, Selamat, Maresova, Krejcar, and Olalekan, “Industry 4.0 for the Construction Industry: Review of Management Perspective,” *Economies*, vol. 7, no. 3, p. 68, Jul. 2019, doi: 10.3390/economies7030068.
- [92] M. K. Habib and C. Chimsom, “Industry 4.0: Sustainability and Design Principles,” in *2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, IEEE, May 2019, pp. 1–8. doi: 10.1109/REM.2019.8744120.
- [93] E. Oztemel and S. Gursev, “Literature review of Industry 4.0 and related technologies,” *J Intell Manuf*, vol. 31, no. 1, pp. 127–182, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10845-018-1433-8.
- [94] H. Cañas, J. Mula, M. Díaz-Madroño, and F. Campuzano-Bolarín, “Implementing Industry 4.0 principles,” *Comput Ind Eng*, vol. 158, p. 107379, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107379.

- [95] W. de Paula Ferreira, F. Armellini, and L. A. De Santa-Eulalia, "Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review," *Comput Ind Eng*, vol. 149, p. 106868, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106868.
- [96] T. Burns, J. Cosgrove, and F. Doyle, "A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0," *Procedia Manuf*, vol. 38, pp. 646–653, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.083.
- [97] A. Martins, H. Costelha, and C. Neves, "Shop Floor Virtualization and Industry 4.0," in *2019 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, IEEE, Apr. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICARSC.2019.8733657.
- [98] P. Ghadimi, C. Wang, M. K. Lim, and C. Heavey, "Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains," *Comput Ind Eng*, vol. 127, pp. 588–600, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2018.10.050.
- [99] Y. Yan, S. Gupta, T. C. Licsandru, and K. Schoefer, "Integrating machine learning, modularity and supply chain integration for Branding 4.0," *Industrial Marketing Management*, vol. 104, pp. 136–149, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.indmarman.2022.04.013.
- [100] A. Forcina and D. Falcone, "The role of Industry 4.0 enabling technologies for safety management: A systematic literature review," *Procedia Comput Sci*, vol. 180, pp. 436–445, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.01.260.
- [101] C. G. Machado, M. P. Winroth, and E. H. D. Ribeiro da Silva, "Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda," *Int J Prod Res*, vol. 58, no. 5, pp. 1462–1484, Mar. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1652777.
- [102] M. Rübmann, M. Lorenz, P. Gebert, M. Waldner, P. Engel, and M. Harnisch, "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries," Boston Consulting Group. Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries
- [103] L. Da Xu, E. L. Xu, and L. Li, "Industry 4.0: state of the art and future trends," *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 8, pp. 2941–2962, Apr. 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- [104] L. Monostori, "Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9–13, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
- [105] F. Almada-Lobo, "The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES)," *Journal of Innovation Management*, vol. 3, no. 4, pp. 16–21, Jan. 2016, doi: 10.24840/2183-0606_003.004_0003.
- [106] B. Dafflon, N. Moalla, and Y. Ouzrout, "The challenges, approaches, and used techniques of CPS for manufacturing in Industry 4.0: a literature review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 113, no. 7–8, pp. 2395–2412, Apr. 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06572-4.
- [107] P. Derler, E. A. Lee, and A. S. Vincentelli, "Modeling Cyber-Physical Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 1, pp. 13–28, Jan. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2011.2160929.
- [108] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao, and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 1, pp. 27–40, Jan. 2017, doi: 10.1109/JAS.2017.7510349.
- [109] S. Nikghadam-Hojjati and J. Barata, "Computational Creativity to Design Cyber-Physical Systems in Industry 4.0," in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Springer New York LLC, 2019, pp. 29–40. doi: 10.1007/978-3-030-28464-0_4.

- [110] S. Garg, K. Kaur, G. Kaddoum, and K.-K. R. Choo, "Toward Secure and Provable Authentication for Internet of Things: Realizing Industry 4.0," *IEEE Internet Things J*, vol. 7, no. 5, pp. 4598–4606, May 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2942271.
- [111] M. Bortolini, E. Ferrari, M. Gamberi, F. Pilati, and M. Faccio, "Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Jul. 2017, pp. 5700–5705. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1121.
- [112] L. Da Xu, W. He, and S. Li, "Internet of Things in Industries: A Survey," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [113] R. Rudenko, I. M. Pires, P. Oliveira, J. Barroso, and A. Reis, "A Brief Review on Internet of Things, Industry 4.0 and Cybersecurity," *Electronics (Basel)*, vol. 11, no. 11, p. 1742, May 2022, doi: 10.3390/electronics11111742.
- [114] K. Marinova-Kostova and I. Kostov, "Application of Internet of Things in Industry 4.0," *Economics. Ecology. Socium*, vol. 5, no. 2, pp. 49–58, Jun. 2021, doi: 10.31520/2616-7107/2021.5.2-6.
- [115] C. Liu and R. Y. Zhong, "Internet of things for manufacturing in the context of industry 4.0," in *Advances in Transdisciplinary Engineering*, IOS Press BV, 2017, pp. 1013–1022. doi: 10.3233/978-1-61499-779-5-1013.
- [116] A. Sartal, R. Bellas, A. M. Mejías, and A. García-Collado, "The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 5, p. 168781402092523, May 2020, doi: 10.1177/1687814020925232.
- [117] E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, and M. Gidlund, "Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 14, no. 11, pp. 4724–4734, Nov. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2852491.
- [118] Y. Liao, E. de Freitas Rocha Loures, and F. Deschamps, "Industrial Internet of Things: A Systematic Literature Review and Insights," *IEEE Internet Things J*, vol. 5, no. 6, pp. 4515–4525, Dec. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2834151.
- [119] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, and T. Watson, "The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework," *Comput Ind*, vol. 101, pp. 1–12, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.04.015.
- [120] M. O. Gokalp, K. Kayabay, M. A. Akyol, P. E. Eren, and A. Kocyigit, "Big Data for Industry 4.0: A Conceptual Framework," in *2016 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, IEEE, Dec. 2016, pp. 431–434. doi: 10.1109/CSCI.2016.0088.
- [121] L. Da Xu and L. Duan, "Big data for cyber physical systems in industry 4.0: a survey," *Enterp Inf Syst*, vol. 13, no. 2, pp. 148–169, Feb. 2019, doi: 10.1080/17517575.2018.1442934.
- [122] M. Y. Santos *et al.*, "A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy," *Int J Inf Manage*, vol. 37, no. 6, pp. 750–760, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.012.
- [123] M. Karatas, L. Eriskin, M. Deveci, D. Pamucar, and H. Garg, "Big Data for Healthcare Industry 4.0: Applications, challenges and future perspectives," *Expert Syst Appl*, vol. 200, p. 116912, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.116912.
- [124] M. Khan, X. Wu, X. Xu, and W. Dou, "Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, May 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICC.2017.7996801.
- [125] F. A. Coda, R. M. de Salles, F. Junqueira, D. J. S. Filho, J. R. Silva, and P. E. Miyagi, "Big data systems requirements for Industry 4.0," in *2018 13th IEEE International*

- Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1230–1236. doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627269.
- [126] R. Patgiri and A. Ahmed, “Big Data: The V’s of the Game Changer Paradigm,” in *2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*, IEEE, Dec. 2016, pp. 17–24. doi: 10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0014.
- [127] M. Ramchander, “Industry 4.0: A Systematic Review of Surveys,” *Southern African Business Review*, vol. 23, Dec. 2019, doi: 10.25159/1998-8125/6032.
- [128] J. Lee, H.-A. Kao, and S. Yang, “Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment,” *Procedia CIRP*, vol. 16, pp. 3–8, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.02.001.
- [129] T. Atobishi, Z. Gábor Szalay, and S. Bayraktar, “CLOUD COMPUTING AND BIG DATA IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0 : OPPORTUNITIES AND CHALLENGES,” in *Proceedings of the IISES Annual Conference, Sevilla, Spain*, International Institute of Social and Economic Sciences, Feb. 2018. doi: 10.20472/IAC.2018.035.004.
- [130] G. Aceto, V. Persico, and A. Pescapé, “Industry 4.0 and Health: Internet of Things, Big Data, and Cloud Computing for Healthcare 4.0,” *J Ind Inf Integr*, vol. 18, p. 100129, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jii.2020.100129.
- [131] M. Armbrust *et al.*, “A view of cloud computing,” *Commun ACM*, vol. 53, no. 4, pp. 50–58, Apr. 2010, doi: 10.1145/1721654.1721672.
- [132] B. Bajic, I. Cosic, B. Katalinic, S. Moraca, M. Lazarevic, and A. Rikalovic, “Edge Computing vs. Cloud Computing: Challenges and Opportunities in Industry 4.0,” in *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, vol. 30, no. 1, Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM, 2019, pp. 0864–0871. doi: 10.2507/30th.daaam.proceedings.120.
- [133] N. Velásquez, E. Estevez, and P. Pesado, “Cloud Computing, Big Data and the Industry 4.0 Reference Architectures,” *J Comput Sci Technol*, vol. 18, no. 03, p. e29, Dec. 2018, doi: 10.24215/16666038.18.e29.
- [134] K. Tange, M. De Donno, X. Fafoutis, and N. Dragoni, “A Systematic Survey of Industrial Internet of Things Security: Requirements and Fog Computing Opportunities,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2489–2520, Oct. 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.3011208.
- [135] C. Matt, “Fog Computing,” *Business & Information Systems Engineering*, vol. 60, no. 4, pp. 351–355, Aug. 2018, doi: 10.1007/s12599-018-0540-6.
- [136] J. F. Lachenmaier, H. Lasi, and H.-G. Kemper, “Simulation of Production Processes Involving Cyber-physical Systems,” *Procedia CIRP*, vol. 62, pp. 577–582, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.06.074.
- [137] B. Rodič, “Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm,” *Organizacija*, vol. 50, no. 3, pp. 193–207, Aug. 2017, doi: 10.1515/orga-2017-0017.
- [138] J. Xu, E. Huang, L. Hsieh, L. H. Lee, Q.-S. Jia, and C.-H. Chen, “Simulation optimization in the era of Industrial 4.0 and the Industrial Internet,” *Journal of Simulation*, vol. 10, no. 4, pp. 310–320, Nov. 2016, doi: 10.1057/s41273-016-0037-6.
- [139] M. Schluse, M. Priggemeyer, L. Atorf, and J. Rossmann, “Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 14, no. 4, pp. 1722–1731, Apr. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2804917.
- [140] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, “Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems,” *Engineering Science and Technology, an*

- International Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.006.
- [141] A. G. Uriarte, A. H. C. Ng, and M. U. Moris, “Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of Industry 4.0,” *Procedia Manuf*, vol. 25, pp. 586–593, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.097.
- [142] T. Masood and J. Egger, “Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors,” *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 58, pp. 181–195, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.02.003.
- [143] Y. Siriwardhana, P. Porambage, M. Liyanage, and M. Ylianttila, “A Survey on Mobile Augmented Reality With 5G Mobile Edge Computing: Architectures, Applications, and Technical Aspects,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 1160–1192, Apr. 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3061981.
- [144] P. Fraga-Lamas, T. M. Fernandez-Carames, O. Blanco-Novoa, and M. A. Vilar-Montesinos, “A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13358–13375, Feb. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2808326.
- [145] A. Vidal-Balea, O. Blanco-Novoa, P. Fraga-Lamas, M. Vilar-Montesinos, and T. M. Fernández-Caramés, “Creating Collaborative Augmented Reality Experiences for Industry 4.0 Training and Assistance Applications: Performance Evaluation in the Shipyard of the Future,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 24, p. 9073, Dec. 2020, doi: 10.3390/app10249073.
- [146] T. Zheng, M. Ardolino, A. Bacchetti, and M. Perona, “The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review,” *Int J Prod Res*, vol. 59, no. 6, pp. 1922–1954, Mar. 2021, doi: 10.1080/00207543.2020.1824085.
- [147] G. W. Scurati, M. Gattullo, M. Fiorentino, F. Ferrise, M. Bordegoni, and A. E. Uva, “Converting maintenance actions into standard symbols for Augmented Reality applications in Industry 4.0,” *Comput Ind*, vol. 98, pp. 68–79, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.02.001.
- [148] M. Gattullo, G. W. Scurati, M. Fiorentino, A. E. Uva, F. Ferrise, and M. Bordegoni, “Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology,” *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 56, pp. 276–286, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2018.10.001.
- [149] Z. Papulová, A. Gažová, and Ľ. Šufliarský, “Implementation of Automation Technologies of Industry 4.0 in Automotive Manufacturing Companies,” *Procedia Comput Sci*, vol. 200, pp. 1488–1497, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.350.
- [150] M. A. Kamarul Bahrin, M. F. Othman, N. H. Nor Azli, and M. F. Talib, “INDUSTRY 4.0: A REVIEW ON INDUSTRIAL AUTOMATION AND ROBOTIC,” *J Teknol*, vol. 78, no. 6–13, pp. 137–143, Jun. 2016, doi: 10.11113/jt.v78.9285.
- [151] J. Venancio Teixeira, M. da Silva Hounsell, and D. Wildgrube Bertol, “How CPS and Autonomous Robots are Integrated to other I4.0 Technologies: a systematic literature review,” *Prod Manuf Res*, vol. 11, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1080/21693277.2023.2279715.
- [152] D. Antonelli and G. Bruno, “Dynamic distribution of assembly tasks in a collaborative workcell of humans and robots,” *FME Transactions*, vol. 47, no. 4, pp. 723–730, 2019, doi: 10.5937/fmet1904723A.
- [153] F. A. Alenizi, S. Abbasi, A. Hussein Mohammed, and A. Masoud Rahmani, “The artificial intelligence technologies in Industry 4.0: A taxonomy, approaches, and future directions,” *Comput Ind Eng*, vol. 185, p. 109662, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109662.

- [154] R. Toorajipour, V. Sohrabpour, A. Nazarpour, P. Oghazi, and M. Fischl, "Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review," *J Bus Res*, vol. 122, pp. 502–517, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2020.09.009.
- [155] Y. K. Dwivedi *et al.*, "Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy," *Int J Inf Manage*, vol. 57, p. 101994, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.08.002.
- [156] O. O. Vergara Villegas, M. Nandayapa, J. H. Sossa Azuela, E. G. Cossio Franco, and G. T. Rubin Linares, "Artificial Intelligence for Industry 4.0 in Iberoamerica," *Computación y Sistemas*, vol. 25, no. 4, pp. 761–773, Dec. 2021, doi: 10.13053/cys-25-4-4056.
- [157] L. A. C. Salazar and B. Vogel-Heuser, "Industrial Artificial Intelligence: A Predictive Agent Concept for Industry 4.0," in *2022 IEEE 20th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, Jul. 2022, pp. 27–32. doi: 10.1109/INDIN51773.2022.9976159.
- [158] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, and R. Suman, "Artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study," *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 07, no. 01, pp. 83–111, Mar. 2022, doi: 10.1142/S2424862221300040.
- [159] Z. Jan *et al.*, "Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities," *Expert Syst Appl*, vol. 216, p. 119456, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.119456.
- [160] P. Ongsulee, "Artificial intelligence, machine learning and deep learning," in *2017 15th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*, IEEE, Nov. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICTKE.2017.8259629.
- [161] S. Banitaan, G. Al-refai, S. Almatarneh, and H. Alquran, "A Review on Artificial Intelligence in the Context of Industry 4.0," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 14, no. 2, pp. 23–30, 2023, doi: 10.14569/IJACSA.2023.0140204.
- [162] R. Garg, "Artificial Intelligence(AI) vs Machine Learning(ML) vs Deep Learning(DL) | by Rajat Garg | Medium," Medium. Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://medium.com/@mrgarg.rajat/artificial-intelligence-ai-vs-machine-learning-ml-vs-deep-learning-dl-69429d4375b1>
- [163] N. Benias and A. P. Markopoulos, "A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0," in *2017 South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, IEEE, Sep. 2017, pp. 1–5. doi: 10.23919/SEEDA-CECNSM.2017.8088234.
- [164] M. Lezzi, M. Lazoi, and A. Corallo, "Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework," *Comput Ind*, vol. 103, pp. 97–110, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.09.004.
- [165] A. J. G. de Azambuja, C. Plesker, K. Schützer, R. Anderl, B. Schleich, and V. R. Almeida, "Artificial Intelligence-Based Cyber Security in the Context of Industry 4.0—A Survey," *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 8, p. 1920, Apr. 2023, doi: 10.3390/electronics12081920.
- [166] A. Corallo, M. Lazoi, and M. Lezzi, "Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts," *Comput Ind*, vol. 114, p. 103165, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.compind.2019.103165.
- [167] A. Corallo, M. Lazoi, M. Lezzi, and A. Luperto, "Cybersecurity awareness in the context of the Industrial Internet of Things: A systematic literature review," *Comput Ind*, vol. 137, p. 103614, May 2022, doi: 10.1016/j.compind.2022.103614.

- [168] J. Leng *et al.*, “Blockchain-Secured Smart Manufacturing in Industry 4.0: A Survey,” *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, vol. 51, no. 1, pp. 237–252, Jan. 2021, doi: 10.1109/TSMC.2020.3040789.
- [169] S. Demirkan, I. Demirkan, and A. McKee, “Blockchain technology in the future of business cyber security and accounting,” *Journal of Management Analytics*, vol. 7, no. 2, pp. 189–208, Apr. 2020, doi: 10.1080/23270012.2020.1731721.
- [170] M. Moghaddam, M. N. Cadavid, C. R. Kenley, and A. V. Deshmukh, “Reference architectures for smart manufacturing: A critical review,” *J Manuf Syst*, vol. 49, pp. 215–225, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jmsy.2018.10.006.
- [171] L. T. Ha, A. D. Marques, and F. Ferreira, “How Industry 4.0 concepts are applied in the Portuguese clothing industry: some evidences,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 459, no. 1, p. 012044, Dec. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012044.
- [172] N. Z. Noor Hasnan and Y. Md. Yusoff, “Short review: Application Areas of Industry 4.0 Technologies in Food Processing Sector,” in *2018 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/SCORED.2018.8711184.
- [173] M. Hernandez-de-Menendez, C. A. Escobar Díaz, and R. Morales-Menendez, “Engineering education for smart 4.0 technology: a review,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 14, no. 3, pp. 789–803, Sep. 2020, doi: 10.1007/s12008-020-00672-x.
- [174] M. Sony and S. Naik, “Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: A systematic review and proposed theoretical model,” *Technol Soc*, vol. 61, p. 101248, May 2020, doi: 10.1016/j.techsoc.2020.101248.
- [175] K. Zhou, Taigang Liu, and Lifeng Zhou, “Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges,” in *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, IEEE, Aug. 2015, pp. 2147–2152. doi: 10.1109/FSKD.2015.7382284.
- [176] L. S. Dalenogare, G. B. Benitez, N. F. Ayala, and A. G. Frank, “The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance,” *Int J Prod Econ*, vol. 204, pp. 383–394, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.019.
- [177] S. Devi K, K. P. Paranitharan, and I. Agniveesh A, “Interpretive framework by analysing the enablers for implementation of Industry 4.0: an ISM approach,” *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 32, no. 13–14, pp. 1494–1514, Oct. 2021, doi: 10.1080/14783363.2020.1735933.
- [178] M. Pérez-Lara, J. A. Saucedo-Martínez, J. A. Marmolejo-Saucedo, T. E. Salais-Fierro, and P. Vasant, “Vertical and horizontal integration systems in Industry 4.0,” *Wireless Networks*, vol. 26, no. 7, pp. 4767–4775, Oct. 2020, doi: 10.1007/s11276-018-1873-2.
- [179] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, and N. F. Ayala, “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies,” *Int J Prod Econ*, vol. 210, pp. 15–26, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.
- [180] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [181] T. L. Olsen and B. Tomlin, “Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management,” *Manufacturing & Service Operations Management*, vol. 22, no. 1, pp. 113–122, Jan. 2020, doi: 10.1287/msom.2019.0796.
- [182] D. Ivanov, A. Dolgui, and B. Sokolov, “The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics,” *Int J Prod Res*, vol. 57, no. 3, pp. 829–846, Feb. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1488086.

- [183] D. Horst and R. Vieira, "Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review," *International Journal of Engineering and Technical Research*, vol. 8, pp. 3–8, Sep. 2018.
- [184] G. D. Goh, S. L. Sing, and W. Y. Yeong, "A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges," *Artif Intell Rev*, vol. 54, no. 1, pp. 63–94, Jan. 2021, doi: 10.1007/s10462-020-09876-9.
- [185] A. Sanders, C. Elangeswaran, and J. Wulfsberg, "Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing," *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, no. 3, p. 811, Sep. 2016, doi: 10.3926/jiem.1940.
- [186] D. Oliveira-Dias, J. M. Maqueira-Marín, and J. Moyano-Fuentes, "The link between information and digital technologies of industry 4.0 and agile supply chain: Mapping current research and establishing new research avenues," *Comput Ind Eng*, vol. 167, p. 108000, May 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108000.
- [187] L. M. Camarinha-Matos, R. Fornasiero, and H. Afsarmanesh, "Collaborative Networks as a Core Enabler of Industry 4.0," in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 506, Springer New York LLC, 2017, pp. 3–17. doi: 10.1007/978-3-319-65151-4_1.
- [188] X. Zhou *et al.*, "Intelligent Small Object Detection for Digital Twin in Smart Manufacturing With Industrial Cyber-Physical Systems," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 18, no. 2, pp. 1377–1386, Feb. 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3061419.
- [189] S.-V. Buer, J. O. Strandhagen, and F. T. S. Chan, "The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda," *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 8, pp. 2924–2940, Apr. 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1442945.
- [190] M. Ghobakhloo and M. Fathi, "Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 31, no. 1, pp. 1–30, Jul. 2019, doi: 10.1108/JMTM-11-2018-0417.
- [191] D. R. Sjödin, V. Parida, M. Leksell, and A. Petrovic, "Smart Factory Implementation and Process Innovation," *Research-Technology Management*, vol. 61, no. 5, pp. 22–31, Sep. 2018, doi: 10.1080/08956308.2018.1471277.
- [192] M. Del Giudice, V. Scuotto, A. Papa, S. Y. Tarba, S. Bresciani, and M. Warkentin, "A Self-Tuning Model for Smart Manufacturing SMEs: Effects on Digital Innovation," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 38, no. 1, pp. 68–89, Jan. 2021, doi: 10.1111/jpim.12560.
- [193] M. Moghaddam and S. Y. Nof, "Collaborative service-component integration in cloud manufacturing," *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 1–2, pp. 677–691, Jan. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1374574.
- [194] M. P. Ciano, R. Pozzi, T. Rossi, and F. Strozzi, "Digital twin-enabled smart industrial systems: a bibliometric review," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 34, no. 7–8, pp. 690–708, Aug. 2021, doi: 10.1080/0951192X.2020.1852600.
- [195] G. Orzes, E. Rauch, S. Bednar, and R. Poklemba, "Industry 4.0 Implementation Barriers in Small and Medium Sized Enterprises: A Focus Group Study," in *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, IEEE, Dec. 2018, pp. 1348–1352. doi: 10.1109/IEEM.2018.8607477.
- [196] J. Alsadi, J. Antony, T. Mezher, R. Jayaraman, and M. Maalouf, "Lean and Industry 4.0: A bibliometric analysis, opportunities for future research directions," *Quality Management Journal*, vol. 30, no. 1, pp. 41–63, Jan. 2023, doi: 10.1080/10686967.2022.2144785.

- [197] M. Yli-Ojanperä, S. Sierla, N. Papakonstantinou, and V. Vyatkin, “Adapting an agile manufacturing concept to the reference architecture model industry 4.0: A survey and case study,” *J Ind Inf Integr*, vol. 15, pp. 147–160, 2019, doi: 10.1016/j.jii.2018.12.002.
- [198] G. L. Tortorella, M. Rossini, F. Costa, A. P. Staudacher, and R. Sawhney, “A comparison on Industry 4.0 and Lean Production between manufacturers from emerging and developed economies,” *TOTAL QUALITY MANAGEMENT & BUSINESS EXCELLENCE*, vol. 32, no. 11, pp. 1249–1270, Aug. 2021, doi: 10.1080/14783363.2019.1696184.
- [199] A. Sajjad *et al.*, “Assessment by Lean Modified Manufacturing Maturity Model for Industry 4.0: A Case Study of Pakistan’s Manufacturing Sector,” *IEEE Trans Eng Manag*, Aug. 2023, doi: 10.1109/TEM.2023.3259005.
- [200] G. L. Tortorella, T. A. Saurin, M. G. Godinho, D. Samson, and M. Kumar, “Bundles of Lean Automation practices and principles and their impact on operational performance,” *Int J Prod Econ*, vol. 235, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2021.108106.
- [201] M. Shahin, F. F. Chen, H. Bouzary, and A. Hosseinzadeh, “Deploying Convolutional Neural Network to Reduce Waste in Production System,” *Manuf Lett*, vol. 35, pp. 1187–1195, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.mfglet.2023.08.127.
- [202] L. Varela, A. Araújo, P. Avila, H. Castro, and G. Putnik, “Evaluation of the Relation between Lean Manufacturing, Industry 4.0, and Sustainability,” *Sustainability*, vol. 11, no. 5, Aug. 2019, doi: 10.3390/su11051439 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI).
- [203] G. L. Tortorella, G. Narayanamurthy, and M. Thurer, “Identifying pathways to a high-performing lean automation implementation: An empirical study in the manufacturing industry,” *Int J Prod Econ*, vol. 231, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107918 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI).
- [204] I. S. Gatell and L. Avella, “Impact of Industry 4.0 and circular economy on lean culture and leadership: Assessing digital green lean as a new concept,” *EUROPEAN RESEARCH ON MANAGEMENT AND BUSINESS ECONOMICS*, vol. 30, no. 1, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.iedeen.2023.100232.
- [205] C. Pereira and H. K. Sachidananda, “Impact of industry 4.0 technologies on lean manufacturing and organizational performance in an organization,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF INTERACTIVE DESIGN AND MANUFACTURING - IJIDEM*, vol. 16, no. 1, pp. 25–36, 2022, doi: 10.1007/s12008-021-00797-7.
- [206] E. Nedjwa, R. Bertrand, and S. S. Boudemagh, “Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean management tools: a bibliometric analysis,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF INTERACTIVE DESIGN AND MANUFACTURING - IJIDEM*, vol. 16, no. 1, pp. 135–150, Aug. 2022, doi: 10.1007/s12008-021-00795-9.
- [207] G. L. Tortorella and D. Fettermann, “Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies,” *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 8, pp. 2975–2987, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1391420 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI).
- [208] S. Kamble, A. Gunasekaran, and N. C. Dhone, “Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies,” *Int J Prod Res*, vol. 58, no. 5, pp. 1319–1337, Aug. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1630772.
- [209] A. Bueno, R. G. G. Caiado, T. L. G. de Oliveira, L. F. Scavarda, M. Godinho, and G. L. Tortorella, “Lean 4.0 implementation framework: Proposition using a multi-method research approach,” *Int J Prod Econ*, vol. 264, 2023, doi: 10.1016/j.ijpe.2023.108988.

- [210] S. V. Buer, M. Semini, J. O. Strandhagen, and F. Sgarbossa, "The complementary effect of lean manufacturing and digitalisation on operational performance," *Int J Prod Res*, vol. 59, no. 7, pp. 1976–1992, Aug. 2021, doi: 10.1080/00207543.2020.1790684.
- [211] V. Tripathi *et al.*, "An Agile System to Enhance Productivity through a Modified Value Stream Mapping Approach in Industry 4.0: A Novel Approach," *Sustainability*, vol. 13, no. 21, 2021, doi: 10.3390/su132111997.
- [212] D. de Oliveira-Dias, J. M. Maqueira-Marin, J. Moyano-Fuetes, and H. Carvalho, "Implications of using Industry 4.0 base technologies for lean and agile supply chains and performance," *Int J Prod Econ*, vol. 262, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijpe.2023.108916.
- [213] Y. N. Qi, Z. G. Mao, M. Zhang, and H. F. Guo, "Manufacturing practices and servitization: The role of mass customization and product innovation capabilities," *Int J Prod Econ*, vol. 228, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107747 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI).
- [214] I. O. Raji, E. Shevtshenko, T. Rossi, and F. Strozzi, "Modelling the relationship of digital technologies with lean and agile strategies," *SUPPLY CHAIN FORUM*, vol. 22, no. 4, pp. 323–346, Aug. 2021, doi: 10.1080/16258312.2021.1925583.
- [215] A. Gunasekaran, Y. Y. Yusuf, E. O. Adeleye, and T. Papadopoulos, "Agile manufacturing practices: the role of big data and business analytics with multiple case studies," *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 1–2, pp. 385–397, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1395488.
- [216] S. Korucuk, E. B. Tirkolaei, A. Aytekin, D. Karabasevic, and C. Karamasa, "Agile supply chain management based on critical success factors and most ideal risk reduction strategy in the era of industry 4.0: application to plastic industry," *OPERATIONS MANAGEMENT RESEARCH*, vol. 16, no. 4, pp. 1698–1719, 2023, doi: 10.1007/s12063-023-00360-5.
- [217] E. Rauch, P. R. Spena, and D. T. Matt, "Axiomatic design guidelines for the design of flexible and agile manufacturing and assembly systems for SMEs," *INTERNATIONAL JOURNAL OF INTERACTIVE DESIGN AND MANUFACTURING - IJIDEM*, vol. 13, no. 1, pp. 1–22, Aug. 2019, doi: 10.1007/s12008-018-0460-1 WE - Emerging Sources Citation Index (ESCI).
- [218] V. Agarwal, A. Z. Hameed, S. Malhotra, K. Mathiyazhagan, S. Alathur, and A. Appolloni, "Role of Industry 4.0 in agile manufacturing to achieve sustainable development," *Bus Strategy Environ*, vol. 32, no. 6, pp. 3671–3688, 2023, doi: 10.1002/bse.3321.
- [219] B. Tronvoll, A. Sklyar, D. Sörhammar, and C. Kowalkowski, "Transformational shifts through digital servitization," *INDUSTRIAL MARKETING MANAGEMENT*, vol. 89, pp. 293–305, 2020, doi: 10.1016/j.indmarman.2020.02.005.
- [220] R. Krishnamurthy and J. Cecil, "A next-generation IoT-based collaborative framework for electronics assembly," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, vol. 96, no. 1, pp. 39–52, Aug. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1561-x WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [221] L. M. Camarinha-Matos, A. D. Rocha, and P. Graça, "Collaborative approaches in sustainable and resilient manufacturing," *J Intell Manuf*, vol. 35, no. 2, pp. 499–519, Aug. 2024, doi: 10.1007/s10845-022-02060-6.
- [222] S. M. N. Al Sunny, X. Q. F. Liu, and M. R. Shahriar, "Communication method for manufacturing services in a cyber-physical manufacturing cloud," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 31, no. 7, pp. 636–652, 2018, doi: 10.1080/0951192X.2017.1407446 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [223] H. W. Lin, S. V. Nagalingam, S. S. Kuik, and T. Murata, "Design of a Global Decision Support System for a manufacturing SME: Towards participating in Collaborative

- Manufacturing,” *Int J Prod Econ*, vol. 136, no. 1, pp. 1–12, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.07.001 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [224] R. Jardim-Goncalves, C. Agostinho, J. Sarraipa, A. Grilo, and J. P. Mendonça, “Reference framework for enhanced interoperable collaborative networks in industrial organisations,” *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 26, no. 1, pp. 166–182, 2013, doi: 10.1080/0951192X.2012.687130 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [225] Z. M. Bi *et al.*, “Security and safety assurance of collaborative manufacturing in industry 4.0,” *Enterp Inf Syst*, vol. 16, no. 12, 2022, doi: 10.1080/17517575.2021.2008512.
- [226] Y. Q. Lu and M. R. Asghar, “Semantic communications between distributed cyber-physical systems towards collaborative automation for smart manufacturing,” *J Manuf Syst*, vol. 55, pp. 348–359, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.05.001 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [227] C. Franze, E. Paolucci, and E. Pessot, “Sustained value creation driven by digital connectivity: A multiple case study in the mechanical components industry,” *TECHNOVATION*, vol. 129, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.technovation.2023.102918.
- [228] Y. J. Lu and J. Cecil, “An Internet of Things (IoT)-based collaborative framework for advanced manufacturing,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, vol. 84, no. 5, pp. 1141–1152, Aug. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7772-0 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [229] J. R. Yebenes and M. Zorrilla, “A Data Governance Framework for Industry 4.0,” *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 19, no. 12, pp. 2130–2138, Aug. 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9480156 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [230] W. J. Yu, T. Dillon, F. Mostafa, W. Rahayu, and Y. H. Liu, “A Global Manufacturing Big Data Ecosystem for Fault Detection in Predictive Maintenance,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 16, no. 1, pp. 183–192, Aug. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2915846 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [231] R. Sharma, S. Kamble, V. Mani, and A. Belhadi, “An Empirical Investigation of the Influence of Industry 4.0 Technology Capabilities on Agriculture Supply Chain Integration and Sustainable Performance,” *IEEE Trans Eng Manag*, Aug. 2022, doi: 10.1109/TEM.2022.3192537.
- [232] M. Trovati, H. Z. Zhang, J. Ray, and X. L. Xu, “An Entropy-Based Approach to Real-Time Information Extraction for Industry 4.0,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 16, no. 9, pp. 6033–6041, Aug. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2962029 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [233] M. Sollfrank, F. Loch, S. Denteneer, and B. Vogel-Heuser, “Evaluating Docker for Lightweight Virtualization of Distributed and Time-Sensitive Applications in Industrial Automation,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 17, no. 5, pp. 3566–3576, Aug. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3022843 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [234] W. Wu, L. D. Shen, Z. H. Zhao, M. Li, and G. Q. Huang, “Industrial IoT and Long Short-Term Memory Network-Enabled Genetic Indoor-Tracking for Factory Logistics,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 18, no. 11, pp. 7537–7548, Aug. 2022, doi: 10.1109/TII.2022.3146598 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).
- [235] Y. F. Zhang, G. Zhang, J. Q. Wang, S. D. Sun, S. B. Si, and T. Yang, “Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things,” *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 28, no. 8, pp. 811–822, Aug. 2015, doi: 10.1080/0951192X.2014.900874 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED).

- [236] R. Rajnoha and J. Hadac, "Strategic Key Elements in Big Data Analytics as Driving Forces of IoT Manufacturing Value Creation: A Challenge for Research Framework," *IEEE Trans Eng Manag*, vol. 71, pp. 90–105, 2024, doi: 10.1109/TEM.2021.3113502.
- [237] P. Zeng, Z. W. Wang, Z. Y. Jia, L. H. Kong, D. Li, and X. Jin, "Time-slotted software-defined Industrial Ethernet for real-time Quality of Service in Industry 4.0," *FUTURE GENERATION COMPUTER SYSTEMS-THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ESCIENCE*, vol. 99, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.04.009.
- [238] V. Roy, T. Schoenherr, and J. Jayaram, "Digital enabled agility: Industry 4.0 unlocking real-time information processing, traceability, and visibility to unleash the next extent of agility," *Int J Prod Res*, vol. 62, no. 14, pp. 5127–5148, 2024, doi: 10.1080/00207543.2023.2284835.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: João Carlos Ribeiro Matos

ISEP, Porto, 12 de setembro de 2024