

Universidades Lusíada

Araújo, Rita Manuela Novais

Estudo sobre a transição digital das ferramentas de melhoria contínua na indústria

<http://hdl.handle.net/11067/8467>

Metadados

Data de Publicação

2025

Resumo

A transformação digital da Indústria 4.0 está a redefinir a eficiência e a melhoria contínua nas organizações, tornando essencial compreender a evolução das ferramentas Lean para modelos suportados digitalmente. A presente dissertação, tem como objetivo analisar a forma como as ferramentas de melhoria contínua estão a ser transformadas e integradas na era da Indústria 4.0, com particular foco na transição digital. Para tal, adotouse uma metodologia assente numa revisão sistemática da literatura,...

The digital transformation driven by Industry 4.0 is redefining efficiency and continuous improvement in organizations, making it essential to understand how Lean tools are evolving into digitally supported models. This dissertation aims to analyse how continuous improvement tools are being transformed and integrated in the era of Industry 4.0, with a particular focus on digital transition. To this end, a methodology based on a systematic literature review was adopted, complemented by structured...

Palavras Chave

Indústria 4.0, Transição Digital, Melhoria Contínua, Lean manufacturing

Tipo

masterThesis

Revisão de Pares

no

Coleções

[ULF-FET] Dissertações

Esta página foi gerada automaticamente em 2026-10-31T14:02:49Z com informação proveniente do Repositório



UNIVERSIDADE LUSÍADA
VILA NOVA DE FAMALICÃO

**ESTUDO SOBRE A TRANSIÇÃO DIGITAL DAS FERRAMENTAS
DE MELHORIA CONTÍNUA NA INDÚSTRIA**

Rita Manuela Novais Araújo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão
Industrial

Vila Nova de Famalicão – julho 2025



UNIVERSIDADE LUSÍADA
VILA NOVA DE FAMALICÃO

**ESTUDO SOBRE A TRANSIÇÃO DIGITAL DAS FERRAMENTAS
DE MELHORIA CONTÍNUA NA INDÚSTRIA**

Rita Manuela Novais Araújo

Orientador: Professora Doutora Ana Cristina Ferreira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão
Industrial

AVISO LEGAL

O conteúdo desta tese reflete as perspectivas, o trabalho e as interpretações do autor no momento da sua entrega. Esta tese pode conter incorreções, tanto conceptuais como metodológicas, que podem ter sido identificadas em momento posterior ao da sua entrega. Por conseguinte, qualquer utilização dos seus conteúdos deve ser exercida com cautela. Ao entregar esta tese, a autora declara que a mesma é resultante do seu próprio trabalho, contém contributos originais e são reconhecidas todas as fontes utilizadas, encontrando-se tais fontes devidamente citadas no corpo do texto e identificadas na secção referências. A autora, declara, ainda, que não divulga na presente tese quaisquer conteúdos cuja reprodução esteja vedada por direitos de autor ou de propriedade industrial.

Declaração sob compromisso de honra

(Artigo 6.º, n.º 2 das Normas e orientações para a submissão de trabalhos académicos na plataforma Urkund para deteção de similaridade e plágio)

Eu, abaixo assinado, tenho consciência de que a prática de plágio consiste numa forma de violação da integridade académica, constituindo um crime punível por lei com relevância nos regimes disciplinar, civil e criminal.

Nesse sentido, declaro por minha honra que a dissertação apresentada é original e que todas as fontes, incluindo as da minha autoria, estão devidamente identificadas e referenciadas.

Vila Nova de Famalicão, 31 de julho de 2025

A Estudante



Agradecimentos

A presente dissertação assinala o culminar de um percurso académico exigente, repleto de desafios e conquistas. A sua concretização só foi possível graças ao contributo, apoio e presença de pessoas que, em diferentes momentos, foram fundamentais. A todas, manifesto o meu mais profundo agradecimento.

À Professora Doutora Ana Cristina Ferreira, minha orientadora, expresso um sincero reconhecimento pela orientação científica rigorosa, pelo incentivo constante e, acima de tudo, pela sua postura profundamente humana. A sua sensibilidade, compreensão e disponibilidade, especialmente nos momentos mais difíceis, foram determinantes para que conseguisse manter o foco e a confiança. A sua presença, sempre encorajadora, ultrapassou o papel académico, tornando-se um verdadeiro apoio pessoal e emocional ao longo deste processo.

Aos meus colegas de turma, agradeço pelo companheirismo, pela entreatajuda e pelas partilhas que tornaram este percurso mais enriquecedor e leve. A convivência e o espírito de grupo vividos ao longo destes dois anos contribuíram significativamente para tornar esta etapa memorável.

Aos meus pais e ao meu irmão, agradeço com todo o meu coração por serem o meu porto seguro. O vosso amor incondicional, o vosso apoio firme e a vossa confiança foram, e continuam a ser, a base de tudo o que sou e conquisto.

Ao meu namorado, dirijo uma palavra de gratidão profunda e emocionada. Mais do que um apoio, foste a minha âncora e a minha força constante. Nos momentos de cansaço, incerteza ou desânimo, estiveste sempre presente, com palavras de encorajamento, com gestos de carinho e com uma fé inabalável em mim. Nunca me deixaste desistir, mesmo quando eu própria duvidei. A tua motivação, o teu apoio incondicional e o amor que sempre me transmitiste foram essenciais para que esta dissertação se tornasse realidade. Este trabalho é também teu, porque sem ti, simplesmente não teria sido possível.

A todos, o meu mais sincero e sentido obrigada.

Resumo

A transformação digital da Indústria 4.0 está a redefinir a eficiência e a melhoria contínua nas organizações, tornando essencial compreender a evolução das ferramentas *Lean* para modelos suportados digitalmente. A presente dissertação, tem como objetivo analisar a forma como as ferramentas de melhoria contínua estão a ser transformadas e integradas na era da Indústria 4.0, com particular foco na transição digital. Para tal, adotou-se uma metodologia assente numa revisão sistemática da literatura, complementada por entrevistas estruturadas a profissionais da indústria nacional, com funções de liderança.

A revisão sistemática da literatura permitiu identificar um conjunto de tecnologias digitais que, ao serem integradas com ferramentas *Lean Manufacturing*, potenciam novas formas de recolha e análise de dados, de monitorização em tempo real e de tomada de decisão baseada em dados. Conjuntamente, as tecnologias de análise de dados e inteligência artificial, IIoT, tecnologias de manufatura avançada e os sistemas integrados representam 83% das referências efetuadas a tecnologias de digitalização identificadas nos documentos incluídos na revisão sistemática da literatura. Relativamente à aplicação da melhoria contínua, as ferramentas de padronização de operações e as ferramentas de diagnóstico de problemas e qualidade são as mais referenciadas. As entrevistas revelam uma realidade incipiente da transição digital, em que coexistem práticas digitais emergentes e modelos tradicionais, sendo notório o papel crítico do fator humano, da liderança e da cultura organizacional no sucesso da digitalização. Com recurso ao modelo de análise de sentimentos, VADER, foi realizada uma avaliação computacional das respostas obtidas nas entrevistas. Os resultados evidenciam uma tendência maioritariamente positiva nas perceções dos entrevistados relativamente à transição digital, embora coexistam desconfiança e hesitação, principalmente associados à resistência à mudança e à escassez de competências digitais. Concluiu-se que a transição digital tem impacto ao nível da eficiência operacional e fator humano. Não foi possível identificar os indicadores de maturidade digital utilizados pelas organizações, constatando-se o uso predominante de métricas operacionais, o que limita uma avaliação estruturada da evolução digital. A presente investigação aponta oportunidades de investigação futura, nomeadamente, na definição de taxonomias, modelos de maturidade e indicadores específicos.

Palavras-Chave: Indústria 4.0, Transição Digital, Melhoria Contínua, *Lean Manufacturing*, *Sentiment Analysis*.

Abstract

The digital transformation driven by Industry 4.0 is redefining efficiency and continuous improvement in organizations, making it essential to understand how Lean tools are evolving into digitally supported models. This dissertation aims to analyse how continuous improvement tools are being transformed and integrated in the era of Industry 4.0, with a particular focus on digital transition. To this end, a methodology based on a systematic literature review was adopted, complemented by structured interviews with national industry professionals in leadership roles.

The systematic literature review identified a set of digital technologies which, when integrated with Lean Manufacturing tools, enable new ways of data collection and analysis, real-time monitoring, and data-driven decision-making. Together, data analytics technologies and artificial intelligence, IIoT, advanced manufacturing technologies, and integrated systems account for 83% of the references to digitalization technologies found in the documents included in the literature review. Regarding the application of continuous improvement, tools for standardizing operations and tools for diagnosing problems and quality issues are the most frequently mentioned. The interviews revealed an emerging reality of digital transition, where emerging digital practices coexist with traditional models. The critical role of the human factor, leadership, and organizational culture in the success of digitalization is evident. Using the VADER sentiment analysis model, a computational assessment of the interview responses was carried out. The results show a predominantly positive trend in the interviewees' perceptions of the digital transition, although distrust and hesitation persist, mainly associated with resistance to change and a lack of digital skills. It was concluded that the digital transition primarily impacts operational efficiency and human factors. It was not possible to clearly identify the digital maturity indicators used by organizations, with operational metrics being predominantly used, which limits a structured assessment of digital evolution. This research highlights opportunities for future investigation, particularly in defining taxonomies, maturity models, and specific indicators.

Keywords: Industry 4.0, Digital Transition, Continuous Improvement, Lean Manufacturing, Sentiment Analysis.

Índice geral

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Índice de Figuras	x
Lista de Abreviaturas.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do Tópico de Investigação	1
1.2. Objetivos e Pergunta de Investigação	3
1.3. Metodologias de Investigação Adotadas	4
1.3.1. RSL e Método PRISMA	5
1.3.2. Análise de Conteúdo	7
1.3.3. Entrevistas Estruturadas	8
1.3.4. <i>Sentiment Analysis</i>	9
1.4. Organização da Dissertação.....	10
2. Parametrização da Implementação da RSL	11
2.1. Planeamento e Implementação	11
2.1.1. Parametrização da Pesquisa P1	12
2.1.2. Análise dos Metadados da Pesquisa P1	16
2.1.3. Parametrização da Pesquisa P2	21
2.1.4. Análise dos Metadados da Pesquisa P2.....	23
2.2. Aplicação da Análise de Conteúdo	28
3. Fundamentação Teórica.....	33
3.1. Indústria 4.0 e a sua Evolução	33
3.1.1. Indústria 1.0 – A Revolução Mecânica	34
3.1.2. Indústria 2.0 – Produção em Massa e Eletrificação	34
3.1.3. Indústria 3.0 – Automação e Tecnologias da Informação.....	34
3.1.4. Indústria 4.0 – Sistemas Ciberfísicos e Fábricas Inteligentes	34
3.2. Tecnologias Digitais da Indústria 4.0	36
3.3. Caracterização dos Processos e Operações da Indústria 4.0.....	39
3.4. Transição e Transformação Digital.....	40
3.4.1. Evolução da Transformação Digital no Contexto Europeu.....	42
3.4.2. Evolução da Transformação Digital no Contexto Português	42
3.5. Melhoria Contínua	44
3.5.1. Ferramentas de Padronização de Operações	45
3.5.2. Ferramentas de Diagnóstico de Problemas e de Qualidade	47

3.5.3. Ferramentas de Análise de Fluxo de Processo	51
3.5.4. Métricas e Ferramentas de Análise de Desempenho	53
3.6. Barreiras e Fatores de Sucesso da Melhoria Contínua	54
3.6.1. Cultura Organizacional.....	54
3.6.2. Compromisso da Liderança.....	55
3.6.3. Resistência à Mudança	55
3.6.4. Formação e Capacitação.....	55
3.6.5. Sustentabilidade das Melhorias	56
4. Análise de Resultados da RSL	57
4.1. Análise da Integração das Tecnologias Digitais	57
4.2. Análise da Integração das Ferramentas de Melhoria Contínua	60
4.3. Discussão Crítica	64
4.3.1. Análise do Impacto na Produtividade e na Eficiência Operacional	64
4.3.2. Impacto na Qualidade.....	67
4.3.3. Impacto na Sustentabilidade.....	69
4.3.4. Impacto no Fator Humano.....	72
4.4. Análise da Relação das Tecnologias Digitais e Melhoria Contínua.....	74
5. Perspetivas da Transição Digital nas PME Portuguesas	81
5.1. Caracterização dos Entrevistados	81
5.2. Análise Qualitativa das Entrevistas	83
5.2 Avaliação de Sentimentos com Técnicas de NLP	95
6. Considerações Finais	102
6.1. Principais Conclusões	102
6.2. Limitações da Investigação.....	105
6.3. Contributo da Dissertação.....	105
Referências Bibliográficas.....	108
Apêndice 1 – Tabela de Bibliografia Anotada da Pesquisa P1	119
Apêndice 2 – Tabela de Bibliografia Anotada da Pesquisa P2	124
Apêndice 3 – Matriz de Tecnologias Digitais das Pesquisas P1 e P2	128
Apêndice 4 – Matriz de Ferramentas de MC das Pesquisas P1 e P2	137
Apêndice 5 – Guião das Questões das Entrevistas	141
Apêndice 6 – Pontuação Classificativa do <i>Sentiment Analysis</i>	142

Índice de Figuras

Figura 1: Representação das Etapas do método PRISMA da pesquisa P1.....	15
Figura 2: Número de publicações entre 2019 e março de 2025, relativos à P1.....	16
Figura 3: Distribuição dos departamentos das empresas nos artigos da P1.	18
Figura 4: Mapa da análise bibliométrica da coocorrência das palavras-chave obtido com o <i>software VOSviewer</i> relativo à P1.	19
Figura 5: Representação das Etapas do método PRISMA da P2.	22
Figura 6: Número de publicações entre 2018 e maio de 2025 relativos à P2.....	23
Figura 7: Distribuição dos departamentos das empresas nos artigos da P2.	26
Figura 8: Mapa da análise bibliométrica da coocorrência das palavras-chave obtido com o <i>software VOSviewer</i> , relativo à P2.	27
Figura 9: Eras da evolução industrial (SENAI, 2019).....	33
Figura 10: Conjunto de tecnologias da Indústria 4.0 (Indústria 4.0, 2021).....	35
Figura 11: Representação das competências digitais em Portugal (Lucas et al., 2021)...	43
Figura 12: Representação dos princípios da ferramenta 5S (Nonato, 2023).....	45
Figura 13: Representação do Ciclo PDCA (ZUP, 2020).....	47
Figura 14: Representação do Diagrama <i>Ishikawa</i> (Cruz, 2024).....	48
Figura 15: Representação da ferramenta. Adaptado de Pinto (2024).....	48
Figura 16: Representação do Ciclo DMAIC do <i>Six Sigma</i> (Minetto, 2018).	49
Figura 17: Representação dos princípios do TQM (TQM, 2019).	49
Figura 18: Representação ferramenta <i>Poka-Yoke</i> . Adaptado de Pinto (2024).	50
Figura 19: Representação do sistema <i>Andon</i> . Adaptado de Pinto (2024).	51
Figura 20: Representação da ferramenta do TPM (Silva & Silva, 2023).....	52
Figura 21: Representação da importância dos KPI (M. Silva, 2014).....	53
Figura 22: Frequência das tecnologias de digitalização mais mencionadas na literatura.	57
Figura 23: Representação da utilização da Ferramentas de MC	61
Figura 24: Fluxo do processamento do <i>Sentiment Analysis no Orange</i>	96
Figura 25: <i>Wordcloud</i> da predominância de sentimento relativos á transição digital nas empresas.	97
Figura 26: <i>Heatmap</i> do <i>Sentiment Analysis</i> realizada na Q2.	97
Figura 27: <i>Heatmap</i> do <i>Sentiment Analysis</i> realizada na Q4.	98
Figura 28: <i>Heatmap</i> do <i>Sentiment Analysis</i> realizada na Q5.	99
Figura 29: <i>Heatmap</i> do <i>Sentiment Analysis</i> realizada na Q6, Q7, Q8 e Q9.....	100

Índice de Tabelas

Tabela 1: Caracterização da abordagem, estratégia e métodos de análise de dados.	4
Tabela 2: Caracterização das duas pesquisas realizadas no âmbito da RSL.	11
Tabela 3: Análise dos critérios de inclusão aplicados na pesquisa P1.	13
Tabela 4: Análise dos critérios de exclusão aplicados na pesquisa P1.....	14
Tabela 5: Tipo de metodologia de investigação aplicada nos documentos da P1.....	17
Tabela 6: Distribuição dos artigos analisados pelo setor industrial para a <i>poll</i> da P1.....	18
Tabela 7: Análise dos critérios de inclusão aplicados na pesquisa P2.	21
Tabela 8: Tipo de metodologia de investigação aplicada nos documentos da P2.....	24
Tabela 9: Distribuição dos artigos analisados pelo setor industrial na P2.....	25
Tabela 10: Critérios de análise de relevância dos artigos.....	29
Tabela 11: Distribuição dos artigos por relevância nas pesquisas P1 e P2.	31
Tabela 12: Barreiras e os fatores de sucesso à implementação da MC.	56
Tabela 13: Matriz de relação das ferramentas MC e das tecnologias digitais.....	75
Tabela 14: Caracterização sociodemográfica dos entrevistados	82
Tabela 15: Transcrição das respostas sobre a transição digital na empresa	83
Tabela 16: Transcrição das respostas sobre a receção da transição digital no chão-de-fabrica	84
Tabela 17: Transcrição das respostas sobre a as ferramentas de MC mais aplicadas	85
Tabela 18: Transcrição das respostas sobre a eficácia das ferramentas de MC	87
Tabela 19: Transcrição das respostas sobre o impacto das tecnologias digitais nos processos de MC	88
Tabela 20: Transcrição das respostas sobre o a digitalização das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> nos níveis de produtividade	89
Tabela 21: Transcrição das respostas sobre o a digitalização das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> na qualidade de processo e produto	90
Tabela 22: Transcrição das respostas sobre o a digitalização das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> na sustentabilidade ambiental e energética.....	91
Tabela 23: Transcrição das respostas sobre o a digitalização das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> em relação aos fatores humanos	93
Tabela 24: Transcrição das respostas sobre os indicadores usados para medir a transição digital.....	94

Lista de Abreviaturas

AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
AI	<i>Artificial Intelligence</i>
AR	<i>Augmented Reality</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CEP	Controlo Estatístico de Processos
CIM	Sistemas Computorizados de Produção
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
DCS	<i>Distributed Control Systems</i>
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve, Control</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HMI	Interfaces Homem-Máquina
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
JIT	<i>Just in time</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
MC	Melhoria Contínua
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
NLP	<i>Natural Language Processing</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
PME	Pequenas e Médias Empresas
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
QUOROM	<i>Quality of Reporting of Meta-analyses</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RL	Revisão de Literatura
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SMED	<i>Single Minute Exchange of Die</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

TPS	<i>Toyota Production System</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UE	União Europeia
UWB	<i>Ultra-Wide Band</i>
VADER	<i>Valence Aware Dictionary and Entiment Reasoner</i>
VR	<i>Virtual Reality</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>

1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os motivos que justificam a escolha do tema de investigação e o seu enquadramento, os objetivos propostos, a pergunta de investigação, a identificação das metodologias de investigação e as técnicas de recolha e análise de dados aplicadas. Por último, apresenta-se a estrutura do documento.

1.1. Enquadramento do Tópico de Investigação

A transformação digital é uma das principais prioridades da União Europeia (UE), tendo vindo a ser definido um conjunto de políticas comunitárias para reforçar as capacidades em matéria de novas tecnologias digitais, abrindo novas oportunidades às empresas para apoiar as competências digitais e a formação dos trabalhadores (Parlamento Europeu, 2023). Desta forma, é importante identificar as tecnologias digitais mais emergentes e analisar a forma como as ferramentas de Melhoria Contínua (MC) já em utilização estão a ser adaptadas a este novo contexto, de modo a criar novas oportunidades às empresas, nos mais diversos setores da indústria e serviços.

A transição digital das ferramentas de MC é um tema pertinente pois, para além de muitas questões ainda não se encontrarem exploradas, este tópico tem uma elevada relevância na Gestão Industrial, sendo a MC um processo que visa aperfeiçoar fluxos de trabalho e as operações de uma organização (Antony et al., 2023).

De acordo com a pesquisa realizada, existe falta de conhecimento associado à evolução e transição tecnológica das ferramentas de MC, bem como os resultados da sua implementação (Fonseca et al., 2014). Revela-se também que, de forma inequívoca, a implementação das diversas ferramentas de MC tem um impacto direto na eficiência dos processos e operações (Mallampati et al., 2018). Nesse sentido, é relevante explorar a forma como a digitalização e transição tecnológica conseguem garantir a excelência operacional e/ou contribuir para um aumento de eficiência produtiva.

Os atuais sistemas de produção procuram o uso racional dos recursos e a eficiência das operações. A produção assente nos sistemas *pull*, *Just-in-Time* (JIT) e a implementação dos princípios de *Concurrent Engineering* são adotadas para garantir o fluxo contínuo e atingir a melhoria sob a condição de redução de custos e aumento da eficiência, de modo a satisfazer ao máximo a procura do cliente (Costa et al., 2024; Leong et al., 2020).

Na era da Indústria 4.0, a MC vai além de simples melhorias. A implementação destas ferramentas promove uma cultura de constante adaptação às mudanças, o que se traduz em benefícios tangíveis. Um dos principais benefícios é a identificação de gargalos e ineficiências nos processos, o que permite implementar soluções ágeis, aumentando a produtividade e reduzindo desperdícios (Butt, 2020). Nas áreas da Gestão da Produção e Gestão de Operações, a Qualidade não se refere apenas à qualidade do produto, mas sobretudo à qualidade do processo. Desta forma, ao identificar e corrigir problemas de qualidade em tempo real, as empresas tentam garantir a entrega de produtos e serviços de excelência aos clientes (Komkowski et al., 2023).

Outro aspeto muito importante é o processo de tomada de decisão baseado em grandes quantidades de dados. A análise avançada de dados possibilita extrair *insights* valiosos, fundamentando uma tomada de decisão informada e orientada por evidências.

Desta forma, é cada vez mais importante conectar os dados recolhidos no chão-de-fabrica com os sistemas de informação, através do uso de *software* como o *Enterprise Resource Planning* (ERP) e o *Manufacturing Execution System* (MES), entre outros. Estes fornecem uma visão integrada dos processos, permitindo uma análise mais eficaz e rápida para suportar a tomada de decisão (Ruivo et al., 2020).

No contexto da integração tecnológica, a digitalização enfatiza que deve ser estabelecido um sistema de informação que conecte a gestão efetuada pelos decisores e a operacionalização (sistema físico). Tal implica que a informação sobre os processos e a informação sobre os recursos possa ser recolhida e analisada em tempo real para planear a produção e assim satisfazer as necessidades do cliente (Jing et al., 2021).

A digitalização *Lean* é uma abordagem de melhoria que integra os princípios e ferramentas *Lean* no processo de gestão da produção das empresas, utilizando sistemas e tecnologias digitais. Os aspetos relevantes da produção *Lean*, como a *Total Productive Maintenance* (TPM), os sistemas *Kanban*, a normalização da produção e a eliminação de desperdícios, beneficiam da introdução de tecnologias digitais (Silvestri et al., 2022).

A aplicação integrada de ferramentas *Lean Manufacturing* e recursos digitais (por exemplo, sensores e dispositivos conectados para adquirir dados em tempo real sobre o desempenho de máquinas, linhas de produção e processos) tem sido uma estratégia eficaz para alcançar níveis mais elevados de excelência operacional (Dillinger et al., 2022; Naciri et al., 2022).

1.2. Objetivos e Pergunta de Investigação

O principal objetivo desta dissertação é estudar de que forma a indústria se está a adaptar à transição digital de processos e de operações, analisando a forma como as ferramentas de MC se têm adaptado a essa transformação. Assim, podem ser identificados como objetivos específicos, os seguintes pontos:

- Compreender o conceito de transição digital e de transformação tecnológica, enquadrado no contexto da Indústria 4.0.
- Identificar as tecnologias de transformação digital que podem trazer maior impacto nos diferentes setores industriais, assim como os fatores-chave que levam a que determinado tipo de ferramentas de MC promova uma maior eficiência dos processos, resultando em melhores índices de qualidade e em menores custos.
- Identificar e caracterizar o conjunto de ferramentas de MC associadas à Gestão de Produção e à Gestão de Operações melhor enquadradas com a transição digital e tecnológica na indústria.
- Estudar de que forma as diferentes ferramentas identificadas se estão a adaptar à mudança com a introdução de novas tecnologias e abordagens e compreender qual o papel dos colaboradores das organizações nessa adaptação.
- Identificar e caracterizar diferentes estratégias que podem ser adotadas para fomentar a transição digital das ferramentas de MC na indústria.
- Identificar os indicadores de avaliação da transição digital e caracterizar o nível de maturidade digital dos diferentes setores da indústria.

Com base nestes objetivos foi definida a pergunta de investigação principal: ***De que forma a indústria se está a adaptar à transição digital, quais as estratégias adotadas e, como se têm adaptado as ferramentas de MC nessa transformação?***

Considerando a abrangência da pergunta de investigação, e de forma a melhor orientar o desenvolvimento do estudo, foram definidas as seguintes sub-perguntas:

- *Quais as principais tecnologias digitais que têm sido aplicadas no contexto da Indústria 4.0?*
- *Que ferramentas de MC estão mais alinhadas com a transição digital na indústria?*
- *Como podem as empresas superar os desafios da resistência à mudança e da falta de competências digitais?*

1.3. Metodologias de Investigação Adotadas

A elaboração da presente dissertação passa pela implementação de uma investigação exploratória, assente na recolha qualitativa de dados, para compreender em profundidade de que forma a indústria se está a adaptar à transição tecnológica e qual o impacto do processo de digitalização na adaptação das ferramentas de MC. A Tabela 1 apresenta uma síntese das escolhas efetuadas em termos de metodologias de investigação (abordagem, estratégia e métodos de análise de dados) adotadas.

Tabela 1: Caracterização da abordagem, estratégia e métodos de análise de dados.

Abordagem	Mista (dedutiva e indutiva)
Natureza	Exploratória
Estratégia primária	Revisão Sistemática da Literatura (RSL)
Método de análise de dados	Análise de conteúdo da RSL
	Aplicação de ferramentas de <i>Sentiment Analysis</i> na análise de entrevistas estruturadas

Do ponto de vista da definição da abordagem, o desenvolvimento da dissertação não se enquadra estritamente em abordagem indutiva ou abordagem dedutiva, mas sim numa combinação (abordagem mista). A análise da literatura que conduziu à definição de perguntas de investigação e à definição de critérios específicos de procura de documentos enquadrados no tópico é característico de uma abordagem dedutiva. Esta abordagem é também fundamental para a realização do enquadramento teórico de suporte à identificação das tecnologias digitais e das ferramentas de MC. Este enquadramento teórico é necessário para estruturar e orientar a investigação, delineando as relações e os conceitos relevantes para o estudo. Para além disso, suporta o processo de investigação, dando robustez e credibilidade à análise e conclusões retiradas. Por outro lado, a análise da literatura é também usada para identificar lacunas e gerar novos *insights* que surgem de um processo de codificação aberta, onde as categorias emergem diretamente da análise do conteúdo dos documentos consultados. Nesta última perspetiva, a abordagem usada é indutiva.

Relativamente à natureza da investigação, este estudo tem uma natureza maioritariamente exploratória. Os estudos exploratórios pretendem avaliar o ponto de situação relativamente a um tópico de investigação, sendo uma abordagem vantajosa para a compreensão de fenómenos complexos, permitindo descobrir os padrões e perceções que possam suportar estudos futuros.

A estratégia primária seguida na elaboração da dissertação passa por uma RSL, para analisar o estado da arte sobre se a transição tecnológica da indústria e a digitalização das ferramentas de MC. A análise de conteúdo foi usada para a análise qualitativa dos documentos incluídos na RSL. Para complementar o estudo desenvolvido, foram efetuadas entrevistas estruturadas e foram usadas ferramentas de *Sentiment Analysis* para complementar a análise qualitativa das respostas obtidas.

1.3.1. RSL e Método PRISMA

Uma RSL é estratégia de investigação estruturada para identificar, avaliar e sintetizar os resultados da investigação sobre um tópico específico, com base na consulta de documentos publicados na literatura. Este método é caracterizado por um processo rigoroso que inclui a definição de perguntas de investigação, o estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão e a pesquisa sistemática de fontes da literatura relevantes em diferentes bases de dados (Kumer et al., 2025). A RSL tem como objetivo fornecer uma visão global dos estudos existentes, identificar tendências e destacar lacunas na literatura, através da consulta de fontes como: artigos científicos, livros e capítulos de livros, atas de conferências (sobretudo com revisão por pares), conteúdo *web* e outras fontes com relevância para a investigação (Kumer et al., 2025).

Entre as principais vantagens associadas à realização de uma RSL, destaca-se a sua capacidade de proporcionar uma visão abrangente do estado atual do conhecimento relativamente a um determinado tema de investigação. Ao proceder à reunião e análise comparativa de um vasto conjunto de estudos científicos, a RSL permite identificar padrões, pontos de convergência e de divergência entre os resultados obtidos, bem como *gaps* na literatura, proporcionando a formulação de novas hipóteses e para a definição de temas de investigação futura (Kumer et al., 2025). Não obstante, importa sublinhar o contributo que esta metodologia oferece no que respeita à transparência e à reprodutibilidade científica, uma vez que os critérios de inclusão e exclusão de estudos são explicitamente definidos, permitindo que outros investigadores possam replicar o processo metodológico e validar os resultados alcançados.

Não obstante os contributos significativos, a RSL apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. Uma das críticas mais recorrentes incide sobre o elevado investimento temporal e de recursos que a sua execução exige, dado que as etapas de recolha, triagem e análise dos dados se revelam, frequentemente, morosas e exigentes.

Adicionalmente, existe o risco de que a RSL não seja capaz de alcançar, de forma eficaz, a identificação de tendências emergentes ou abordagens inovadoras que ainda não tenham sido amplamente exploradas na literatura científica. Este aspeto pode comprometer a sua aplicabilidade em contextos ou áreas de conhecimento em constante e rápida evolução (Kumer et al., 2025). Outro aspeto crítico prende-se com a dependência da qualidade metodológica dos estudos incluídos na revisão: conclusões sustentadas em investigações de qualidade duvidosa ou metodologicamente frágeis podem comprometer a validade e a robustez dos resultados obtidos através da RSL.

Elaborar uma pesquisa abrangente é essencial para identificar literatura relevante. Isto inclui a seleção de bases de dados apropriadas, termos de pesquisa (palavras-chave) e critérios de inclusão/exclusão. Uma RSL relata detalhes específicos do tópico em estudo para a avaliação crítica, incluindo quaisquer entendimentos ou interpretações específicas dos critérios de avaliação relevantes para a revisão. Para que uma RSL acomode adequadamente as variações na qualidade dos estudos incluídos, a avaliação deve ser crítica por causa dos potenciais riscos de viés de cada estudo (Lisy, 2015).

Assim, nesta RSL, pretende-se recolher e analisar a literatura para além de avaliar conceitos, teorias e modelos pré-estabelecidos sobre as diferentes ferramentas aplicadas pelas empresas no processo de transição digital, assim como as ferramentas de MC.

Uma RSL emprega métodos para identificar todos os estudos relevantes a uma pergunta de investigação específica (derivada de pesquisas preliminares), avalia os desenhos dos estudos, resume as descobertas, destaca os pontos-chave, identifica as razões para as discrepâncias nos resultados e lista as lacunas de conhecimento existentes (Sharma & Bhattarai, 2022). O método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) constitui uma das diretrizes mais reconhecidas e utilizadas a nível internacional para a elaboração de RSL e respetivas meta-análises. O PRISMA surgiu como uma evolução do protocolo (*Quality of Reporting of Meta-analyses* (QUOROM)), com o objetivo de padronizar o processo de pesquisa de RSL, promovendo a clareza, a exaustividade e a qualidade das informações apresentadas.

Este estrutura-se em torno de uma lista de verificação (*checklist*) composta por itens como o título e resumo, introdução, metodologia, resultados, discussão e conclusão. Estes itens incluem, por exemplo, a formulação clara das perguntas de investigação, a descrição das estratégias de investigação em bases de dados, os critérios de inclusão e exclusão de estudos, os métodos de avaliação da qualidade dos dados e a síntese dos resultados.

A aplicação rigorosa do método PRISMA e da sua *checklist* permite garantir que a RSL seja conduzida de forma transparente, consistente e passível de replicação por outros investigadores (Sharma & Bhattarai, 2022).

Um elemento distintivo do PRISMA é o diagrama de fluxo, conhecido como *PRISMA Flow Diagram*, que representa visualmente as diferentes fases do processo de seleção dos estudos: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Este diagrama detalha o número total de registos, o número de duplicados removidos, os estudos excluídos em cada fase e as justificações para essas exclusões. Tal representação gráfica contribui não só para a clareza do processo metodológico, mas também para a credibilidade científica da revisão. A adoção do PRISMA tem demonstrado impactos positivos na qualidade e no rigor das RSL. Contudo, a sua aplicação requer conhecimento técnico e atenção ao detalhe, dado que uma má interpretação pode comprometer a qualidade da revisão.

A extração de dados é o processo que ocorre entre a identificação dos estudos elegíveis e a análise dos dados, seja uma síntese qualitativa ou uma síntese quantitativa, envolvendo o agrupamento de dados numa meta análise. A extração de dados permite obter informações sobre os estudos incluídos em termos das características individuais e do conjunto de publicações selecionadas e que partilham o mesmo processo de *screening* (Lajeunesse, 2016; Taylor et al., 2021).

1.3.2. Análise de Conteúdo

A análise de conteúdo (*Content Analysis*, designação na língua inglesa) é amplamente utilizada para interpretar dados textuais com o objetivo de identificar padrões, categorias temáticas e significados subjacentes. De acordo com Krippendorff (2004), a análise de conteúdo pode ser definida como uma "*técnica de investigação para fazer inferências replicáveis e válidas a partir de textos (ou outros materiais) para os contextos do seu uso*". Esta definição destaca o seu carácter sistemático e a sua aplicabilidade, sobretudo em contextos qualitativos, permitindo ao investigador extrair significado de grandes volumes de dados verbais, escritos ou visuais.

De acordo com Neuendorf & Kumar (2016), a análise de conteúdo fornece uma síntese para interpretar a vasta e variada literatura incluída numa RSL. Ao definir unidades de análise claras, sejam palavras, frases ou segmentos temáticos, e estabelecer esquemas de codificação fundamentados em teorias ou perguntas de investigação, os investigadores podem minimizar o viés subjetivo e garantir que as suas categorizações sejam replicáveis.

Nesse sentido, a codificação efetuada durante a parametrização da RSL toma uma grande relevância para minimizar ambiguidades e reforçar o rigor da revisão e subsequente análise de conteúdo. Esta clareza metodológica não só aumenta a reprodutibilidade, como também fornece um registo documental suportado pelo corpo de literatura consultado (Bengtsson, 2016). Desta forma, a análise de conteúdo enriquece a narrativa de uma RSL ao sintetizar tanto o conteúdo explícito (temas articulados) como o conteúdo latente (conceitos subjacentes ou implícitos). A síntese resultante pode elucidar a evolução de estruturas teóricas, mapear relações conceptuais e descobrir áreas pouco exploradas e promissoras para investigação futura.

1.3.3. Entrevistas Estruturadas

A entrevista estruturada configura-se como uma técnica de recolha de dados em que o investigador segue, de forma rigorosa, um guião previamente definido, composto por um conjunto fixo de perguntas, colocadas sempre pela mesma ordem e com formulação idêntica a todos os participantes. Tal como definido por Saunders et al. (2019), este tipo de entrevista é particularmente apropriado quando se pretende garantir a uniformização das respostas, facilitando a comparação entre diferentes entrevistados e promovendo a fiabilidade dos dados recolhidos. A sua estrutura rígida é especialmente útil em estudos ou em investigações que visam comparar perceções sobre temas previamente identificados como relevantes na literatura, assegurando que todos os tópicos fundamentais são abordados de forma sistemática.

A entrevista estruturada oferece a vantagem de permitir uma recolha eficiente e consistente da informação, sobretudo quando o objetivo é verificar até que ponto determinadas ideias, práticas ou tendências identificadas teoricamente estão presentes na realidade empírica. Neste tipo de entrevista, o papel do entrevistador é minimizado a uma função técnica de condução do guião, reduzindo a interferência interpretativa e a influência sobre as respostas. Segundo Saunders et al. (2019), este controlo metodológico torna a entrevista estruturada particularmente adequada em contextos em que se deseja mitigar enviesamentos e garantir a comparação direta entre os diferentes pontos de vista recolhidos.

Além disso, quando aplicada a participantes com cargos de responsabilidade, como líderes organizacionais, este formato favorece a objetividade da resposta e o foco nas dimensões predefinidas, reduzindo dispersões temáticas (Saunders et al., 2019).

No contexto da presente investigação, a utilização da entrevista estruturada surge como uma forma de complementar a análise efetuada com base na RSL. O objetivo é comparar os resultados obtidos através da análise científica com a perspetiva empírica de profissionais em posições de liderança na realidade industrial Portuguesa. A aplicação de um guião de perguntas uniformizado, baseado nos principais tópicos emergentes da RSL, permite avaliar até que ponto as evidências teóricas são reconhecidas ou experienciadas no terreno. Assim, a entrevista estruturada torna-se uma ferramenta rigorosa e eficaz para validar, confirmar ou questionar os dados teóricos, assegurando a comparabilidade entre entrevistados e reforçando a credibilidade analítica da investigação. Esta abordagem contribui para o alinhamento entre teoria e prática e para a construção de conhecimento aplicado, relevante e contextualizado.

1.3.4. *Sentiment Analysis*

As ferramentas de *Sentiment Analysis* – o estudo computacional de opiniões, sentimentos e emoções – são cada vez mais utilizadas em diferentes contextos. Esta “análise de sentimentos” permite aos investigadores processar dados qualitativos, *e.g.*, respostas a inquéritos, entrevistas, entre outros (Sweta, 2024).

A análise de sentimentos é um ramo do *Natural Language Processing* (NLP) que consiste em identificar, extrair e analisar dados subjetivos, classificando sequências de texto em categorias positivas, negativas ou neutras (polaridade das respostas). As primeiras abordagens baseavam-se em métodos lexicais, recorrendo a glossários associados a sentimentos ou emoções específicas, aos quais eram atribuídas pontuações de polaridade com base na presença e frequência dessas palavras. Apesar da simplicidade deste método, a sua adoção implica trabalhar com nuances contextuais e dificuldades inerentes à linguagem de domínios específicos (Parmar et al., 2018). Por outro lado, as abordagens baseadas em *machine learning*, particularmente modelos de aprendizagem supervisionada e árvores de decisão, tornaram-se cada vez mais comuns na aplicação de *Sentiment Analysis*. Estas abordagens são treinadas em conjuntos de dados categorizados para avaliar padrões e relações complexas entre características textuais e categorias de sentimento.

Mais recentemente, as técnicas de *deep learning* emergiram como o estado da arte no que diz respeito ao *Sentiment Analysis*, aproveitando arquiteturas capazes de captar relações mais profundas nos textos. Enquanto as abordagens de *machine learning* permitem equilibrar eficiência e precisão na categorização de sentimentos, as abordagens de *deep*

learning alcançam um desempenho superior, ainda que ao custo de menor interpretabilidade (Deshpande et al., 2025).

Um dos modelos mais recorrentemente usados no *Sentiment Analysis* é o *Valence Aware Dictionary and Entiment Reasoner* (VADER), um modelo desenvolvido especificamente para analisar sentimentos expressos em dados textuais. O VADER combina um léxico de sentimentos, ou seja, uma lista de *tokens* lexicais (palavras, expressões categorizadas com a sua respetiva polaridade e intensidade de sentimento) com um conjunto de heurísticas para avaliar o “sentimento” de um texto. O VADER não requer dados de treinamento, o que o torna altamente eficiente e fácil de implementar em aplicações em tempo real. Ele é especialmente eficaz no tratamento de linguagem informal, gerando quatro métricas de sentimento: positivo, neutro, negativo e uma pontuação composta, que é uma soma ponderada e normalizada. A pontuação varia de -1 (mais negativo) a +1 (mais positivo). A pontuação composta é frequentemente usada para classificar a polaridade geral do sentimento. A sua eficácia e simplicidade transformam este modelo numa ferramenta utilizada na linguística computacional, especialmente para análises de sentimento rápidas e independentes de domínio (Sweta, 2024).

1.4. Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos principais. O primeiro capítulo descreve a importância e o enquadramento do tópico de investigação, os objetivos a serem atingidos, a metodologia utilizada e a organização da dissertação. No segundo capítulo, é apresentada a parametrizações da RSL onde se descreve o planeamento, a implementação da RSL, a análise dos metadados de pesquisa obtidos e, por fim, o processo desenvolvido para a análise de conteúdo. O enquadramento teórico dos dois principais tópicos surge no terceiro capítulo onde os temas da transição digital e da MC são explorados. No quarto capítulo é realizada uma análise de conteúdo da RSL onde são apresentados os principais resultados sobre a forma a indústria se está a adaptar à transição tecnológica e como as ferramentas de MC têm sido integradas no processo de digitalização. No quinto capítulo é apresentada uma análise das perceções de 9 industriais entrevistados sobre a temática em questão, tendo sido aplicadas ferramentas de *Sentiment Analysis*. Por fim, no sexto capítulo apresentam-se as principais conclusões e contributos da dissertação, assim como as sugestões de trabalho futuro.

2. Parametrização da Implementação da RSL

Neste capítulo são descritas e analisadas todas as etapas realizadas na implementação da RSL sobre a transição digital das ferramentas de MC na indústria. O capítulo inicia-se com a identificação da plataforma de consulta de documentos científicos, seguindo-se a definição do processo de implementação com a adoção do método PRISMA. Para além disso, são também apresentados neste capítulo a definição dos critérios de inclusão e de exclusão dos artigos a serem selecionados para a etapa seguinte, análise do conteúdo.

2.1. Planeamento e Implementação

Para o planeamento da RSL foi utilizada a plataforma de pesquisa *Scopus*. A *Scopus* é uma base de dados de literatura científica com revisão por pares (*peer-review*), mundialmente reconhecida no meio académico, sendo um recurso multidisciplinar para a pesquisa, descoberta e análise de produção científica. O sistema de revisão por pares permite validar e melhorar a qualidade da investigação publicada. Embora existam limitações associadas, a revisão por pares é condição de garantia de qualidade das diferentes plataformas de pesquisa, sendo um requisito amplamente aceite para validação da investigação (Elsevier Inc, 2025).

De forma a auxiliar os investigadores e padronizar a pesquisa, o diagrama de fluxo desenvolvido pela PRISMA em 2020, demonstra três etapas que devem ser respeitadas no processo de identificação, seleção e triagem dos documentos presentes nas bases de dados científicas de pesquisa. A Tabela 2 apresenta a estrutura adotada para a recolha de artigos na RSL, distinguindo as duas pesquisas realizadas na plataforma *Scopus*.

Tabela 2: Caracterização das duas pesquisas realizadas no âmbito da RSL.

Parâmetros	Pesquisa P1	Pesquisa P2
Plataforma de pesquisa	<i>Scopus</i>	<i>Scopus</i>
Campos de pesquisa	Título, palavras-chave e resumo (<i>TITLE-ABS-KEY</i>)	Título, palavras-chave e resumo (<i>TITLE-ABS-KEY</i>)
Termos de pesquisa	<i>“Industry 4.0”AND “Digital Transition”</i>	<i>“Industry 4.0”AND “Digital Transition” AND “Continuous Improvement”</i>

Em ambas as pesquisas, os termos de pesquisa incluíram o título, as palavras-chave e o resumo dos artigos (*TITLE-ABS-KEY*), de forma a garantir uma recolha abrangente e inclusiva dos documentos relevantes para os objetivos da dissertação.

A pesquisa P1 foi realizada utilizando os termos “*Industry 4.0*” e “*Digital Transition*”, refletindo o foco inicial no estudo da digitalização e das tecnologias emergentes no contexto industrial. Esta configuração visou incluir artigos cujo conteúdo estivesse explicitamente alinhado com os conceitos centrais da investigação, garantindo a relevância temática para a questão de investigação.

A pesquisa P2 manteve a pesquisa na plataforma *Scopus* e aplicou a mesma configuração de campos de pesquisa (*TITLE-ABS-KEY*), mas com a introdução de um termo adicional de procura: “*Continuous Improvement*”. Este ajuste permitiu estreitar o espectro de artigos identificados, incluindo estudos que abordassem de forma explícita a interligação entre a transição digital, a Indústria 4.0 e as ferramentas de MC mais adotadas neste contexto.

Esta abordagem metodológica assegurou a inclusão de um conjunto mais abrangente de estudos, mais alinhados com o objetivo central da dissertação de compreender como a transição digital impacta na aplicação das ferramentas de MC na indústria.

2.1.1. Parametrização da Pesquisa P1

No âmbito da primeira fase da aplicação do método PRISMA à pesquisa P1, e como já referido, as palavras-chave definidas foram “*Industry 4.0*” e “*Digital Transition*”. Estas foram selecionadas com base na questão de investigação e nos objetivos definidos para o estudo. Esta pesquisa resultou numa recolha abrangente de 96 documentos (*poll* inicial).

Com o intuito de refinar os resultados obtidos e garantir a sua relevância e adequação, foram aplicados critérios específicos de inclusão e exclusão. Esta etapa permitiu ajustar os parâmetros da pesquisa conduzindo à obtenção de um conjunto final de 59 estudos (*poll* final) para posteriormente serem analisados.

A Tabela 3 descreve todos os parâmetros que foram considerados no processo de definição dos critérios de inclusão da pesquisa P1, sendo apresentada a devida justificação. Os critérios em análise incluem o período de publicação, estado de publicação, tipologia de documentos e língua de redação dos documentos.

Tabela 3: Análise dos critérios de inclusão aplicados na pesquisa P1.

Parâmetro	Especificação	Justificação
Período de publicação	Não aplicável	Uma vez que com a <i>poll</i> inicial o horizonte temporal obtido era entre 2019 e 2025 foram incluídos todos os documentos.
Estado de Publicação	Publicado	Apenas foram consideradas publicações já revistas e validadas com o processo de revisão completo.
Tipo de documentos	Artigo de revista científica Artigo de conferência internacional Artigo de Revisão da Literatura (RL)	Foram considerados todos os tipos de documentos com exceção a capítulos de livros.
Língua de redação	Inglês e Português	Devido a serem as línguas nas quais existem mais pesquisa científica e existe é possível interpretar o documento.

Os critérios de inclusão estabelecidos para esta RSL foram definidos de forma a garantir a relevância, qualidade e coerência dos estudos selecionados. Em relação ao período de publicação, optou-se por não impor uma restrição prévia, considerando que a pesquisa inicial retornou publicações compreendidas entre 2019 e março de 2025. Assim, todos os documentos publicados durante esse intervalo temporal foram incluídos. No que diz respeito ao estado de publicação, foram considerados apenas artigos publicados oficialmente, o que significa que passaram por processo de revisão por pares e foram validados por editores, assegurando a confiabilidade e o rigor científico das fontes analisadas. Quanto ao tipo de documento, foram incluídos artigos de revistas científicas, artigos apresentados em conferências internacionais e artigos de RL (seja revisão sistemática ou não). Por fim, os idiomas de inclusão foram o inglês e o português, pois são as línguas com maior quantidade de literatura científica disponível sobre os temas abordados e ambas são de fácil interpretação para a autora deste trabalho.

Relativamente aos critérios de exclusão, estes foram essenciais para restringir os documentos que não estavam alinhados com os objetivos específicos desta pesquisa. Entre os principais critérios, destaca-se a exclusão de artigos de áreas científicas como Ciências Sociais, Engenharia Química, Psicologia, Veterinária, e outras áreas que não estavam diretamente relacionadas com a transição digital e Indústria 4.0. A sua exclusão foi motivada pela compreensão de que não contribuem para o desenvolvimento dos principais objetivos, os quais se focam em áreas tecnológicas e industriais.

Dessa forma, a pesquisa concentrou-se em estudos que abordam, de forma direta ou indireta, os fenómenos e processos ligados à transformação digital e à inovação tecnológica no contexto da indústria.

Além disso, a exclusão de documentos aos quais não foi possível obter acesso ao documento integral (completo) também foi considerada. A falta de acesso ao texto integral compromete a análise detalhada do conteúdo dos estudos, dificultando uma compreensão precisa e a avaliação da sua relevância. Para garantir a qualidade da revisão, os artigos que após uma avaliação do resumo não estavam diretamente relacionados com o tema da investigação foram descartados. Para isso, foi aplicada uma escala de avaliação de relevância, variando de 1 a 5, onde 1 representava baixa relevância para a investigação e 5 elevada relevância para a investigação. Assim, os artigos com pontuação 1 ou 2 foram excluídos da RSL por apresentarem baixa relevância para os objetivos do trabalho. Essa abordagem assegurou que apenas estudos com um impacto significativo na compreensão do tema da pesquisa fossem considerados para a análise final. A Tabela 4 retrata os critérios de exclusão aplicados na pesquisa P1.

Tabela 4: Análise dos critérios de exclusão aplicados na pesquisa P1.

Parâmetro	Especificação	Justificação
Área científica	Ciências Sociais Engenharia Química Astronomia e Física Terra e Ciências Planetárias Psicologia Ciências da Agricultura Ciências Biológicas Veterinária Profissões de Saúde Artes e Humanidades	Foram excluídas as áreas científicas descritas nas especificações por se considerar que não vão de encontro aos principais objetivos estabelecidos para este trabalho.
Acesso ao documento	Sem acesso ao documento integral (completo)	Os documentos nos quais não foi possível aceder ao texto completo foram também excluídos por não permitirem ter uma correta perceção de todo o conteúdo
Não relacionado com o tema da investigação	Escala de avaliação de relevância	Na <i>poll</i> final foram ainda analisados todos os documentos e atribuída uma cotação de acordo com a sua relevância para os objetivos e tema deste trabalho. A escala variava de 1 a 5 onde 1 era baixa relevância e 5 era muito relevante. Os artigos com pontuações de 1 e 2 foram excluídos para a análise final e inclusão na análise de conteúdo da RSL.

Após a realização da pesquisa P1 e a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foi elaborado o fluxograma do processo RSL adotado. Assim, a Figura 1 representa o fluxograma do processo de seleção de estudos científicos, desenvolvido com base nas diretrizes PRISMA. O processo encontra-se dividido em três fases principais: identificação, triagem e inclusão.

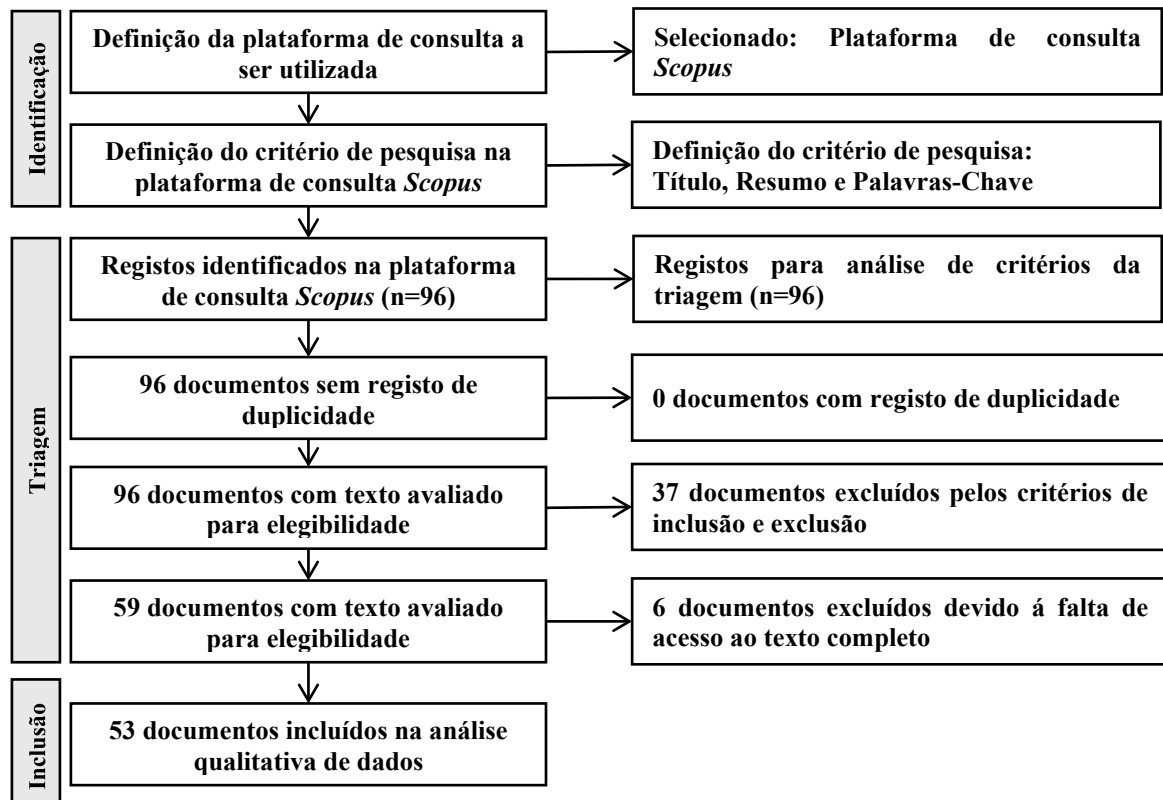


Figura 1: Representação das etapas do método PRISMA da pesquisa P1.

Como já mencionado, na fase de identificação, foi definida a plataforma *Scopus* como fonte exclusiva para a recolha de literatura científica. Foram aplicados critérios de pesquisa restritos aos campos de título, resumo e palavras-chave, resultando na identificação inicial de 96 documentos. Não se registaram duplicações nos resultados obtidos, mantendo-se o total de documentos para a fase seguinte.

Na fase de triagem, os 96 documentos inicialmente identificados foram sujeitos a uma avaliação preliminar com base nos critérios de inclusão e exclusão, o que resultou na exclusão de 37 documentos. Os 59 documentos restantes foram analisados quanto à disponibilidade de acesso ao texto completo, tendo sido excluídos 6 documentos, dado que o acesso à totalidade do conteúdo é condição indispensável para a análise qualitativa. Por fim, foram considerados 53 artigos científicos, os quais passaram a constituir a *poll* final da análise qualitativa de dados.

2.1.2. Análise dos Metadados da Pesquisa P1

Nesta secção, apresenta-se a meta-análise dos resultados da primeira iteração do processo de implementação da RSL, a pesquisa P1. Na sequência do processo de triagem, foram inicialmente exportados 59 artigos a partir da base de dados (consultar Apêndice 1). A distribuição por ano de publicação dos 59 artigos, evidencia uma tendência crescente de publicações relacionadas com o tema em estudo ao longo do tempo. O ano de 2019, apresenta 3 artigos, seguido de apenas 1 publicação em 2020. A partir de 2021, observa-se um aumento na produção científica, com 8 artigos publicados nesse ano, 11 em 2022 e 15 artigos em 2023. Em 2024, o número sobe ainda mais, totalizando 18 publicações, o que evidencia um interesse crescente e contínuo na área. Até março de 2025, momento da realização da análise, existiam 3 artigos publicados que respeitavam os critérios da pesquisa, como surge apresentado na Figura 2.

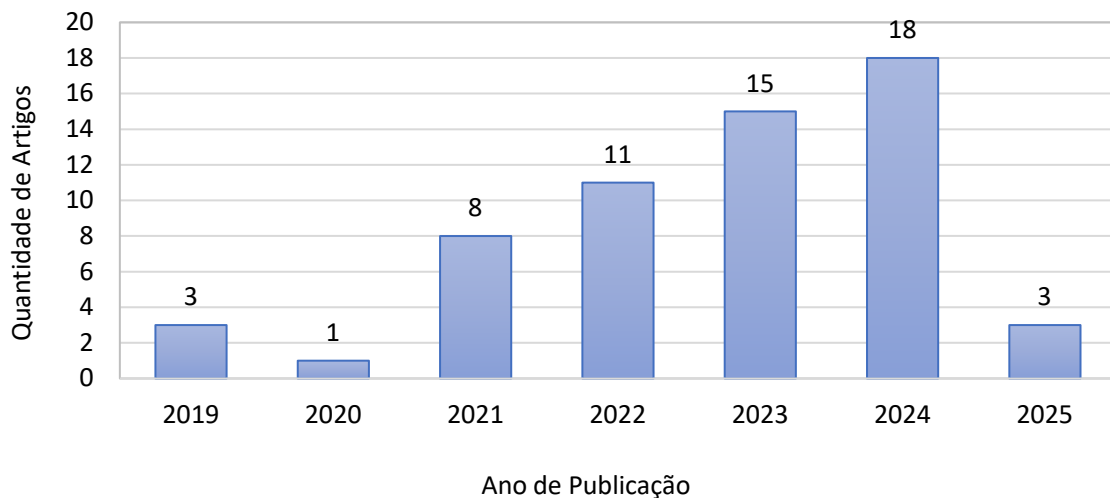


Figura 2: Número de publicações entre 2019 e março de 2025, relativos à P1.

Em 6 desses artigos não foi possível ter acesso ao texto completo, o que impossibilitou a sua inclusão na análise. Assim, foi possível proceder à avaliação de 53 artigos. Relativamente às metodologias adotadas nos 53 estudos analisados, verifica-se um predomínio das abordagens qualitativas e exploratórias. A RL foi a metodologia mais recorrente, sendo identificada em 31 artigos, o que reflete uma forte ênfase na consolidação de conhecimentos teóricos sobre o tema. A RSL foi utilizada em 7 estudos, evidenciando uma abordagem mais rigorosa e estruturada na seleção e análise das fontes.

No que respeita a investigações empíricas, foram identificados 5 casos de estudo e 7 estudos de caso, representando diferentes formas de análise de contextos específicos.

Além disso, 3 artigos se basearam na aplicação de questionários, destacando-se como a única abordagem quantitativa diretamente identificada. Em 8 dos artigos não foi definido nenhum método de investigação específico. Esta diversidade metodológica, apresentada na Tabela 5 contribui para uma compreensão mais abrangente e multidimensional do tema em estudo.

Tabela 5: Tipo de metodologia de investigação aplicada nos documentos da P1.

Metodologia	Nº de Artigos
RL	31
RSL	7
Caso de Estudo ¹	5
Estudo de Caso ²	7
Não definido	8
Questionário	3

A análise dos 53 artigos validados demonstra uma ampla variedade de setores industriais abordados, refletindo a aplicabilidade transversal do tema investigado, como demonstra a Tabela 6. A maioria dos estudos (38 artigos) enquadra-se numa categoria de indústria generalizada, sem especificação de um setor particular, o que evidencia uma abordagem mais abrangente ou aplicável a múltiplos contextos industriais onde se englobam também Pequenas e Médias Empresas (PME). Entre os setores específicos, destacam-se os setores automóvel e energético, com 5 e 3 artigos, respetivamente. O setor da indústria têxtil-vestuário e calçado (2 artigos) e os restantes (aeroespacial, construção, manufatura aditiva, mobiliário e naval) foram representados por um único artigo cada, revelando um menor volume de estudos focados em nichos industriais específicos.

Esta diversidade setorial sugere uma crescente atenção ao tema em diferentes contextos produtivos, ainda que com maior concentração em análises de carácter mais generalista.

¹ **Caso de Estudo:** É um exemplo prático ou casuístico, usado para demonstrar ou explicar conceitos. Não segue um protocolo de investigação formal e tem menor rigor científico.

² **Estudo de Caso:** É uma metodologia formal de investigação, com um protocolo estruturado. Analisa profundamente uma situação real, com recolha e triangulação de dados, para responder a questões de investigação.

Tabela 6: Distribuição dos artigos analisados pelo setor industrial para a *poll* da P1.

Setor Industrial	Nº de Artigos
Indústria generalizada	38
Automóvel	5
Energético	3
Têxtil - vestuário e calçado	2
Aeroespacial	1
Construção	1
Manufatura aditiva	1
Mobiliário	1
Naval	1

A Figura 3 retrata os diferentes departamentos referenciados nos 53 documentos analisados. No que diz respeito aos departamentos organizacionais focados nos estudos consultados, verifica-se um predomínio claro da área de Gestão de Operações, presente em 29 dos 53 artigos analisados (correspondendo a 55%). Este destaque evidencia a relevância do tema no contexto da gestão de processos, eficiência e desempenho organizacional.



Figura 3: Distribuição dos departamentos das empresas referenciados nos artigos da P1.

A Logística e a Produção são identificadas em 8 artigos (15%), respetivamente, o que reforça a importância da cadeia de abastecimento e da movimentação eficiente de recursos no âmbito das investigações e da eficiência operacional.

A disposição das palavras-chave e as ligações entre elas foram determinadas automaticamente pelo algoritmo do *VOSviewer*, com base na frequência com que os termos ocorrem conjuntamente nos documentos. A rede é segmentada em vários agrupamentos cromáticos (*clusters*), que representam áreas temáticas distintas, permitindo uma visualização clara da estrutura conceptual do domínio em análise. As ligações representadas por linhas, indicam a força de coocorrência entre os mesmos. A espessura das linhas é proporcional à frequência com que os termos aparecem conjuntamente, sendo que as ligações com maior espessura indicam relações mais fortes no *corpus* bibliográfico analisado. Salienta-se que a identificação dos termos é apresentada na língua inglesa visto que os dados são exportados para o *VOSviewer* diretamente da *Scopus*.

Através do mapa bibliométrico é possível perceber um *cluster* central relacionado com o conceito de “*Industry 4.0*” (*cluster* amarelo), identificando assim a principal área temática, bem como as relações entre os tópicos mais recorrentes na literatura científica.

O *cluster* verde agrupa conceitos relacionados com tecnologias produtivas e automação, tais como “*smart factory*”, “*Artificial Intelligence (AI)*”, “*cyber-physical systems*” e “*manufacturing*”, evidenciando a ênfase colocada na modernização dos processos industriais.

O *cluster* vermelho contempla termos associados à transformação digital, à sustentabilidade e ao impacto ambiental, sugerindo uma crescente interligação entre a digitalização e os princípios do desenvolvimento sustentável.

O *cluster* azul refere-se a aspetos técnicos e organizacionais, nomeadamente “*information management*”, “*industrial revolutions*” e “*embedded systems*”. Por sua vez, o *cluster* roxo agrega aplicações sectoriais, como a indústria da construção e as cadeias de abastecimento, enquanto o *cluster* laranja integra elementos conceptuais e metodológicos fundamentais, incluindo “*literature review*”, “*technology*”, “*digital transition*” e “*conceptual framework*”.

Em termos globais, o mapa evidencia a natureza multidisciplinar e intersectorial da Indústria 4.0, envolvendo domínios como a engenharia, a gestão, as ciências ambientais e a informática. Para além disso, permite confirmar que os tópicos mais discutidos atualmente no contexto da quarta revolução industrial não se limitam à dimensão tecnológica, mas incorporam também preocupações sociais, ambientais e organizacionais, numa perspetiva integrada de transformação digital.

2.1.3. Parametrização da Pesquisa P2

O processo de parametrização da pesquisa P2 foi efetuado seguindo a mesma iteração de passos que a pesquisa P1. Como mencionado, na pesquisa P2 foi introduzida no campo de pesquisa como palavra-chave adicional “*Continuous Improvement*”, de forma a especificar a componente de análise da MC juntamente com as anteriormente mencionadas (“*Industry 4.0*” e a “*Digital Transition*”). Esta pesquisa resultou em 44 documentos (*poll* inicial). De forma semelhante, os resultados obtidos passaram por um processo de refinamento onde foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão de forma a garantir a relevância e adequação dos documentos aos objetivos de pesquisa. A Tabela 7 descreve os parâmetros de inclusão que foram considerados e a justificação da utilização dos mesmos.

Tabela 7: Análise dos critérios de inclusão aplicados na pesquisa P2.

Parâmetro	Especificação	Justificação
Período de publicação	Não aplicável	Uma vez que com a <i>poll</i> inicial o horizonte temporal obtido correspondia ao período entre 2018 e 2025, foram incluídos todos os documentos.
Estado de Publicação	Publicada	Apenas foram consideradas publicações já revistas e validadas com o processo de revisão completo.
Tipo de documentos	Artigo de revista científica Artigo de conferência internacional Artigo de RL	Foram considerados todos os tipos de documentos com exceção a capítulos de livros.
Língua de redação	Inglês e Português	Devido a serem as línguas nas quais existem mais pesquisa científica e existe é possível interpretar o documento.

De forma a assegurar a consistência metodológica entre ambas as iterações de pesquisa, os critérios aplicados são idênticos aos definidos na Pesquisa P1, reforçando assim a robustez do processo de seleção e permitindo a comparação direta entre os conjuntos de artigos obtidos. Assim, na pesquisa P2, mantendo os mesmos parâmetros, foram incluídos documentos publicados entre 2018 e maio de 2025, sem restrição prévia de período de publicação. Apenas foram consideradas publicações validadas e revistas por pares, assegurando a qualidade científica das fontes analisadas.

Foram incluídos artigos de revista científica, artigos de conferência internacional e RL. Por fim, tal como na pesquisa P1, a seleção de artigos foi limitada a publicações em inglês e português, dado serem as línguas mais representativas no domínio da investigação sobre transição digital e MC, bem como aquelas que garantem uma correta interpretação pelo autor da dissertação.

Tal como na pesquisa P1, foram aplicados exatamente os mesmos critérios de exclusão, assegurando, assim, a coerência metodológica. A exclusão de artigos baseou-se em dois critérios fundamentais: exclusão dos artigos aos quais não foi possível aceder ao texto completo; exclusão dos artigos que não apresentavam relação direta com o tema da investigação, aplicando a mesma escala definida na secção 2.1.1. Assim, foram considerados para análise apenas os artigos que obtiveram classificação de 3 ou superior, tendo sido excluídos aqueles que receberam pontuação de 1 ou 2, por não abordarem a integração das ferramentas de MC no contexto da transição digital da indústria. A Figura 5 representa o fluxograma do método PRISMA adotado à pesquisa P2, dividido nas etapas de identificação, triagem e inclusão.

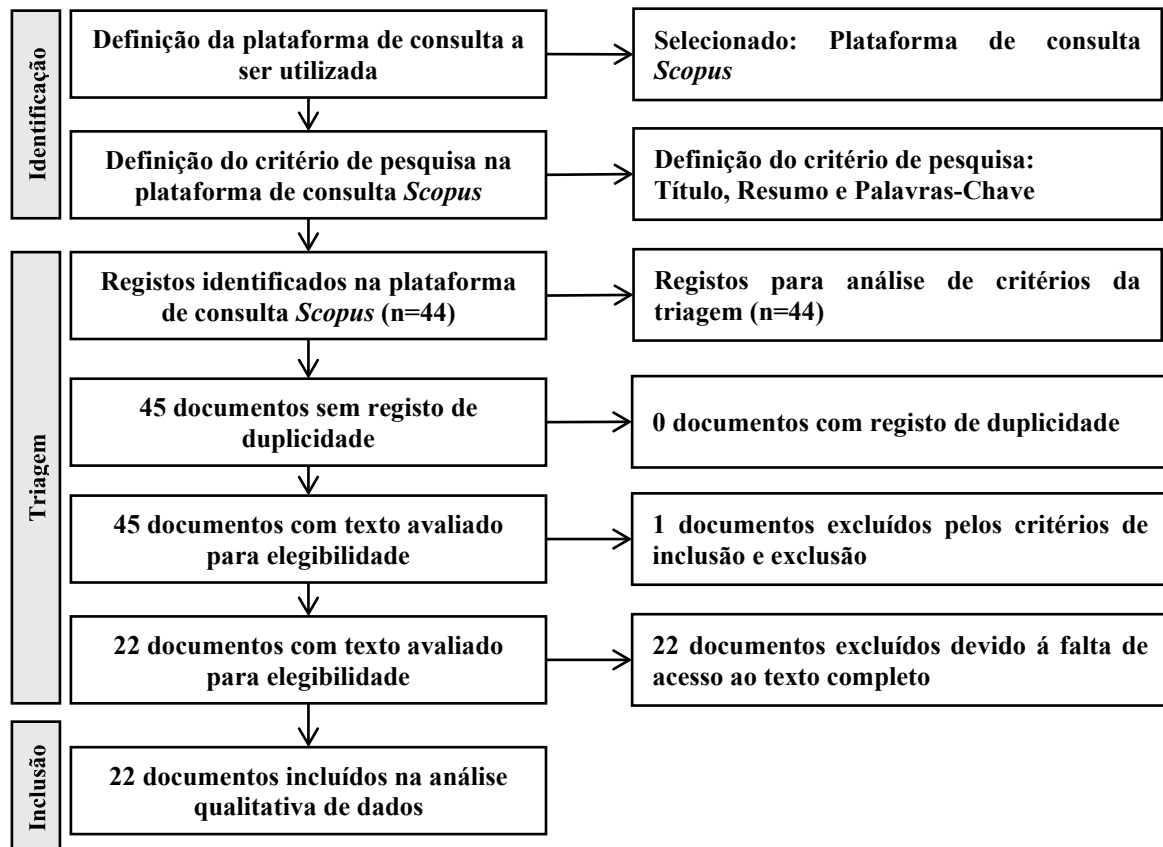


Figura 5: Representação das etapas do método PRISMA da P2.

A pesquisa teve início com a definição da plataforma de consulta, tendo sido novamente selecionada a base de dados *Scopus*. Foram aplicados critérios de pesquisa nos campos título, resumo e palavras-chave, resultando na identificação de 45 documentos.

Não foram detetadas duplicações, permitindo a progressão da total idade dos documentos para a fase seguinte. Na fase de triagem, todos os 45 documentos foram verificados quanto ao acesso ao texto completo e à adequação aos critérios previamente definidos. Nesta etapa, um artigo foi excluído por não cumprir os critérios de elegibilidade temáticos e 22 artigos foram descartados devido à indisponibilidade do texto integral, comprometendo a possibilidade de análise de conteúdo. Portanto, 22 documentos foram considerados elegíveis, avançando para inclusão (*poll final*). A fase de inclusão resultou na seleção dos 22 artigos com acesso validado ao conteúdo completo, os quais foram integrados na análise qualitativa (análise de conteúdo).

2.1.4. Análise dos Metadados da Pesquisa P2

A análise dos documentos resultantes da pesquisa P2 permitiu identificar e caracterizar o conjunto de artigos incluídos para análise. A Figura 6 apresenta a distribuição dos 44 artigos incluídos na meta-análise da Pesquisa 2, organizados por ano de publicação (consultar Apêndice 2). A análise dos dados revela uma tendência de crescimento na quantidade de publicações até 2022, refletindo o aumento do interesse académico e científico pela temática da transição digital das ferramentas de MC na indústria.

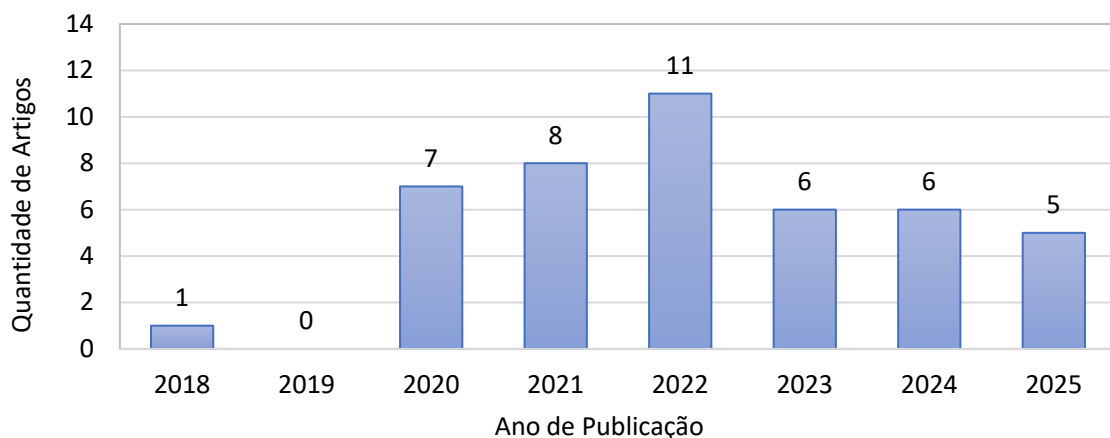


Figura 6: Número de publicações entre 2018 e maio de 2025 relativos à P2.

O primeiro artigo identificado remonta ao ano de 2018, com apenas um estudo publicado. Em 2019, não foram registadas publicações para os critérios definidos.

A partir de 2020, observa-se um aumento na produção científica, com 7 artigos publicados nesse ano, seguido de 8 artigos em 2021 e um pico de 11 artigos em 2022, o que representa o ponto mais elevado da produção académica no período analisado. Nos anos seguintes, verifica-se uma ligeira diminuição no número de publicações identificadas a partir plataforma *Scopus*, com 6 artigos em 2023, 6 artigos em 2024 e 5 artigos em 2025.

Após esta filtragem, foi possível proceder à análise detalhada de 22 artigos com acesso completo, que constituem a *poll* final da Pesquisa P2. A Tabela 8 apresenta a classificação dos 22 artigos incluídos na meta-análise de acordo com a metodologia de investigação adotada em cada estudo. A análise evidencia a predominância de abordagens qualitativas, destacando a relevância de métodos exploratórios e de revisão no campo deste tema.

Tabela 8: Tipo de metodologia de investigação aplicada nos documentos da P2.

Metodologia	Nº de Artigos
RL	11
RSL	13
Estudo de Caso	4
Investigação-Ação	2
Questionário	3

A RSL destaca-se como a metodologia mais representada, sendo identificada em 13 artigos. Esta abordagem caracteriza-se por um processo estruturado e rigoroso de identificação, seleção e síntese de estudos relevantes, reforçando a qualidade e a fiabilidade dos contributos apresentados. Em segundo lugar, verifica-se a utilização da RL em 11 artigos, sendo esta uma metodologia igualmente relevante para a consolidação de conceitos teóricos.

No que respeita a abordagens empíricas, identificaram-se 4 artigos que recorrem à metodologia de Estudo de Caso e foram ainda identificados 2 artigos baseados em Investigação-Ação, uma metodologia que combina intervenção prática e investigação científica, permitindo ao investigador colaborar diretamente com as organizações na implementação de mudanças e na análise dos seus impactos.

Por fim, 3 artigos recorreram ao Questionário como técnica de recolha de dados primários, permitindo captar perceções e práticas de diferentes setores envolvidos na transição digital das organizações.

De igual forma à pesquisa P1, também neste processo de pesquisa a distribuição metodológica dos artigos revela uma predominância de abordagens qualitativas e exploratórias, especialmente RL e RSL, indicando que o campo de estudo ainda se encontra em fase de consolidação teórica. A presença reduzida de estudos empíricos, como estudos de caso e investigação-ação, sugere a necessidade de aprofundar a investigação aplicada, de modo a validar os conceitos teóricos identificados e apoiar a implementação prática das ferramentas de MC no contexto da transição digital.

A Tabela 9 apresenta a classificação dos 22 artigos incluídos na meta-análise, segundo o setor de atividade abordado em cada estudo. A análise revela uma predominância significativa de artigos que, apesar de serem aplicados ao contexto industrial, não identificam um setor industrial específico.

Tabela 9: Distribuição dos artigos analisados pelo setor industrial na P2.

Setor Industrial	Nº de Artigos
Indústria Generalizada	17
Automóvel	2
Cutelaria	1
Educação	1
Indústria Química (Polímeros)	1

A Figura 7 apresenta a distribuição dos artigos, segundo o departamento ou área organizacional das empresas em cada estudo. Esta análise permite compreender o foco dos trabalhos científicos relativamente à área de aplicação das ferramentas de MC no contexto da transição digital.

O departamento de Gestão de Operações destaca-se de forma clara, sendo mencionado em 13 artigos (59%). Esta predominância reflete a importância estratégica da Gestão de Operações na implementação de práticas de MC e de tecnologias digitais, dado o seu papel central na gestão de processos, na eficiência produtiva e na transição digital das organizações. O departamento de Produção surge como o segundo mais representado (14% dos artigos), evidenciando o interesse na análise de fluxos produtivos e na aplicação prática das ferramentas *Lean*, *Six Sigma* e outras metodologias no chão-de-fábrica.



Figura 7: Distribuição dos departamentos das empresas referenciados nos artigos da P2.

Cada uma das áreas de Logística e Qualidade é referida em 2 artigos (correspondente a 9%), demonstrando a relevância destas funções na adaptação a novas tecnologias e na integração com as estratégias de MC, nomeadamente, no que diz respeito à gestão da cadeia de abastecimento e ao controlo de processos.

Por sua vez, os departamentos de Planeamento e Recursos Humanos são menos referidos, cada um representado por 1 artigo (correspondendo a 5%). Esta menor representação não diminui, contudo, a sua relevância: no caso do planeamento, trata-se de uma função crítica para a integração de dados e a sincronização de processos na era digital, enquanto o departamento de recursos humanos é fundamental para a gestão da mudança, a capacitação de equipas e a promoção de competências digitais essenciais à transição tecnológica.

A Figura 8 apresenta o mapa de coocorrência de palavras-chave gerado através do software *VOSviewer*, onde foram aplicadas as mesmas configurações utilizadas na Figura 4 de forma a ser possível comparar as diferenças. O termo “*continuous improvement*” emerge como o conceito central da rede, com um elevado número de ligações a palavras-chave como “*digitalization*”, “*benchmarking*”, “*key performance indicators*”, “*case studies*” e “*data handling*”, todos integrados no *cluster* vermelho. Este núcleo conceptual evidencia o papel estruturante das práticas de MC nas estratégias industriais contemporâneas, fortemente interligadas com a avaliação de desempenho, análise de dados e abordagens metodológicas baseadas em evidência.

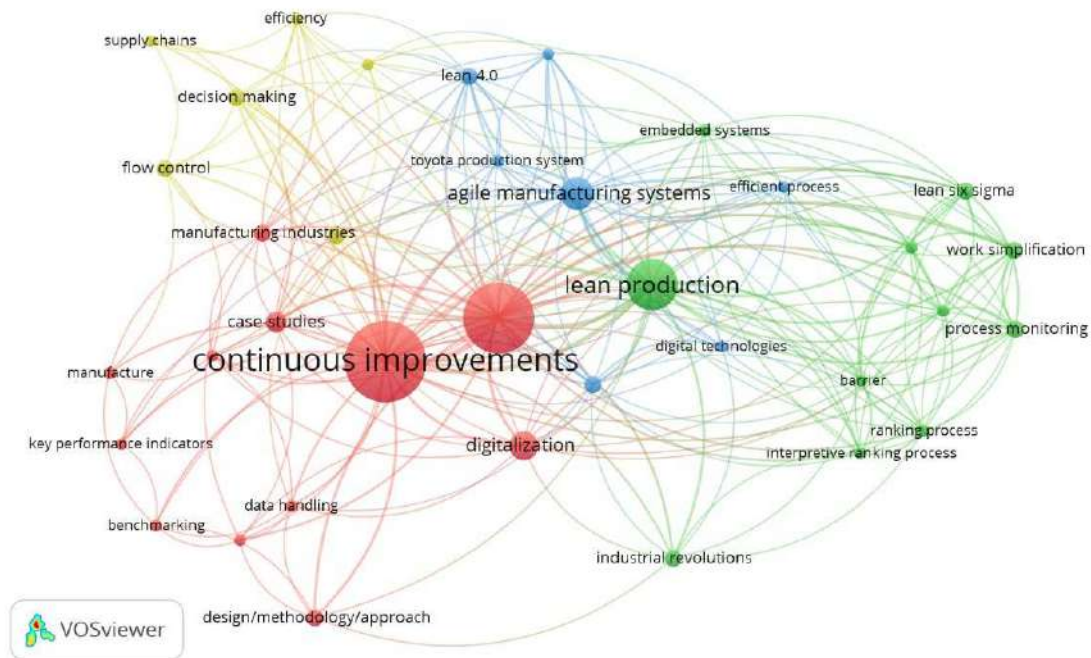


Figura 8: Mapa da análise bibliométrica da coocorrência das palavras-chave obtido com o *software VOSviewer*, relativo à P2.

O *cluster* verde destaca-se pela ocorrência de palavras como “*Lean production*”, em articulação com conceitos como “*Lean Six sigma*”, “*process monitoring*”, “*ranking process*” e “*work simplification*”, traduzindo o foco da literatura na eficiência operacional, no controlo da qualidade e na melhoria sistemática das operações.

O *cluster* azul reúne termos associados à Indústria 4.0, como “*agile manufacturing systems*”, “*Lean 4.0*”, “*digital technologies*” e “*embedded systems*”, sinalizando uma tendência emergente de integração entre metodologias *Lean*, tecnologias digitais e sistemas de produção ágeis.

O *cluster* amarelo, embora de menor densidade, reúne termos relacionados com fluxos logísticos e suporte à decisão, nomeadamente “*supply chains*”, “*decision making*”, “*flow control*” e “*efficiency*”, evidenciando uma atenção crescente ao impacto da transformação digital na cadeia de valor industrial.

Esta representação valida a relevância da articulação entre as ferramentas de MC e os processos de digitalização industrial. A análise confirma a convergência entre práticas *Lean*, tecnologias digitais e transformação organizacional, fenómeno central ao objeto de estudo desta dissertação.

2.2. Aplicação da Análise de Conteúdo

No contexto desta investigação, a análise de conteúdo dos documentos selecionados no processo de implementação da RSL foi aplicada às duas iterações de pesquisa realizadas (P1 e P2), com o objetivo de compreender como as ferramentas de MC estão a ser digitalizadas e integradas no paradigma da transição digital na Indústria 4.0.

A análise de conteúdo nesta investigação justifica-se pela natureza exploratória do estudo e pela ausência de categorias pré-definidas no campo específico da digitalização das ferramentas de MC na Indústria 4.0. Este tipo de abordagem permite a análise da informação dos documentos consultados, assegurando uma compreensão mais fiel e contextualizada (Bengtsson, 2016; DeFranco & Laplante, 2017). Importa salientar que este tipo de análise permite gerar conhecimento a partir da interpretação sistemática de conteúdos textuais, permitindo identificar padrões e significados relevantes sem limitar o processo analítico a esquemas teóricos (Spurlock et al., 2008).

A análise foi realizada em três etapas distintas. A primeira corresponde à pré-análise, durante a qual se procedeu à leitura flutuante dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos da *poll* final. Este processo permitiu a identificação preliminar de temas recorrentes, tais como a digitalização de práticas *Lean*, o impacto da transformação digital na qualidade, a sustentabilidade na era digital e a aplicação de indicadores de desempenho em ambientes industriais.

Na segunda etapa, efetuou-se a codificação e categorização dos dados. Para isso, recorreu-se à análise das variáveis extraídas da base de dados: tipo de documento, metodologia utilizada, área científica, setor industrial, departamento organizacional e ferramenta/tema relevante. A análise evidenciou que a maioria dos artigos da *poll* final tem origem em publicações científicas, embora também estejam representadas comunicações em conferência. As metodologias mais frequentes foram as RL, os estudos de caso e as abordagens exploratórias. Destaca-se a prevalência de artigos enquadrados em áreas como a Qualidade, a Gestão de Operações e a Sustentabilidade Operacional, com aplicação transversal a setores como o automóvel, a manufatura geral e as PME.

A terceira etapa correspondeu à interpretação dos dados à luz das perguntas de investigação. Com o objetivo de assegurar a qualidade e pertinência dos estudos incluídos na análise, foi realizada uma avaliação dos artigos selecionados na amostra final da RSL, com base em três critérios de base previamente definidos:

- Alinhamento com o tema da investigação;

- Contributo efetivo para os objetivos do estudo;
- Qualidade científica do artigo.

O primeiro critério, relativo ao alinhamento com o tema da revisão, permitiu aferir até que ponto o conteúdo do artigo abordava, de forma direta e substantiva, a problemática da transição digital das ferramentas de MC na indústria. O segundo critério, referente ao contributo para os objetivos da investigação, avaliou a relevância do estudo face às questões de investigação definidas, nomeadamente no que diz respeito à identificação de práticas, desafios, estratégias ou benefícios associados à digitalização de ferramentas de MC. Por fim, o terceiro critério, respeitante à qualidade científica do artigo, teve em consideração aspetos como a solidez metodológica, a clareza na apresentação dos resultados, a factualidade das fontes e o prestígio da publicação científica. Para cada artigo incluído na *poll* final, foi então atribuída uma classificação de 1 a 5 pontos com base nos critérios acima identificados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Critérios de análise de relevância dos artigos.

Classificação	Relevância	Critérios
1	Relevância Baixa	Não aborda ferramentas de MC nem transição digital na indústria; Não contribui significativamente para o tema;
2	Relevância Média-Baixa	Foca tópicos adjacentes sem ligação explícita às ferramentas de MC; Contributo limitado para a investigação;
3	Relevância Média	Trata de temas relacionados, mas sem articulação clara entre Indústria 4.0 e MC; Contributo indireto;
4	Relevância Média-Alta	Aborda a transição digital e ferramentas de MC, mas não como foco principal; Contributos relevantes para a investigação; Boa qualidade científica.
5	Relevância Alta	Aborda diretamente a transição digital das ferramentas de MC na Indústria 4.0; Contribuição substancial para a investigação; Alta qualidade científica.

A classificação 5, ou **relevância alta**, foi atribuída aos artigos que abordam diretamente a transição digital aplicada às ferramentas de MC, como *Kaizen*, *Six Sigma*, entre outras, no contexto da Indústria 4.0. Estes artigos oferecem uma contribuição substancial para os objetivos da investigação, apresentando casos práticos, modelos teóricos ou análises críticas que articulam a transformação digital com as práticas de MC. Além disso, possuem uma elevada qualidade científica, com uma base empírica ou conceptual sólida, metodologias rigorosas e são publicados em fontes académicas reconhecidas.

A classificação 4, ou **relevância média-alta**, foi atribuída aos artigos que tratam da transição digital no setor industrial, incluindo referências às ferramentas de MC, embora não como foco principal. Estes artigos apresentam contributos relevantes para a investigação, como a análise de tecnologias digitais aplicadas à gestão da qualidade, aos processos produtivos ou à melhoria operacional. A qualidade científica é boa, com uma estrutura metodológica coerente e dados pertinentes, embora com menor profundidade ou foco do que os artigos classificados com a pontuação máxima.

A classificação 3, ou **relevância média**, foi atribuída aos artigos que abordam temas relacionados com a Indústria 4.0 ou com ferramentas de MC, mas sem explorar claramente a articulação entre ambos. O contributo para a investigação é indireto, oferecendo contexto geral ou conceitos úteis, mas não centrais à temática da transição digital. A qualidade científica é aceitável, embora apresente algumas limitações metodológicas ou enquadramentos teóricos menos aprofundados.

A classificação 2, ou **relevância média-baixa**, foi atribuída aos artigos que se focam em tópicos adjacentes, como inovação digital, automatização ou melhoria de processos, sem uma ligação explícita às ferramentas de MC. O contributo para os objetivos da investigação é limitado e pouco aplicável à problemática da digitalização das práticas de MC. A qualidade científica é fragilizada pela ausência de uma fundamentação robusta ou por uma bibliografia desatualizada.

Finalmente, a classificação 1, ou **relevância baixa**, foi atribuída aos artigos que não apresentam qualquer foco sobre as ferramentas de MC nem sobre a transição digital na indústria. Estes artigos não contribuem de forma significativa para o tema em análise, sendo apenas tangenciais ou fora de escopo. A qualidade científica é considerada fraca, com metodologias débeis ou sem valor acrescentado para os objetivos do estudo. A Tabela 11 abaixo demonstra os resultados obtidos após a classificação dos artigos da *poll* final para ambas as pesquisas efetuadas.

Tabela 11: Distribuição dos artigos por relevância nas pesquisas P1 e P2.

Relevância	Pesquisa P1	Pesquisa P2
1- Baixa	9	2
2- Média Baixa	10	0
3- Média	11	4
4- Média Alta	12	5
5- Alta	11	11
Média da Classificação:	3,1	4,0

A classificação dos artigos por grau de relevância permite observar a distribuição dos estudos selecionados em ambas as fases da pesquisa (pesquisa P1 e pesquisa P2) de acordo com uma escala ordinal de cinco níveis, variando entre 1 (relevância baixa) e 5 (relevância alta).

No caso da pesquisa P1, verifica-se que a maioria dos artigos se concentra nos níveis intermédios e superiores da escala, nomeadamente nos níveis 4 (média/alta) e 5 (alta), com 12 e 11 artigos respetivamente. Esta tendência revela um conjunto de publicações com contributos significativos para os objetivos da investigação. Contudo, também se registam 9 artigos com relevância baixa (nível 1) e 10 com relevância média/baixa (nível 2), o que indica uma presença considerável de estudos tangenciais ou de menor pertinência temática.

Já na pesquisa P2, observa-se uma maior concentração de artigos nos níveis superiores da escala: 5 artigos com classificação média/alta (nível 4) e 11 artigos com relevância alta (nível 5). De salientar que não foram identificados artigos com classificação 2 (média/baixa) nesta segunda pesquisa, e apenas 2 artigos foram classificados com relevância baixa. Esta distribuição evidencia uma elevada consistência temática e a qualidade dos artigos considerados na pesquisa P2, reforçando a sua utilidade para a análise de conteúdo.

A média ponderada da relevância dos artigos reflete uma pontuação de 3,1 na pesquisa P1 e 4,0 na pesquisa P2, sugerindo uma manutenção do nível elevado de pertinência científica nos dois conjuntos, ainda que com uma ligeira dispersão na fase inicial. Estes resultados corroboram a eficácia dos critérios de inclusão e exclusão previamente definidos e reforçam a validade da *poll* final de artigos selecionados para a análise qualitativa da presente investigação.

O processo de análise de conteúdo permitiu, assim, construir uma visão estruturada sobre o estado atual da investigação científica no domínio da transição digital das ferramentas de MC no contexto da Indústria 4.0, revelando não só os tópicos mais debatidos, mas também as lacunas que subsistem na literatura e que justificam futuras investigações.

3. Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os fundamentos e conceitos teóricos essenciais à compreensão do processo de transição digital na indústria. Desta forma, é primeiramente efetuada uma contextualização da Indústria 4.0, abordando a sua evolução, os conceitos-chave e as tecnologias associadas. Seguidamente, analisa-se a transformação digital, distinguindo-se os conceitos de digitização e digitalização, com foco na sua aplicação no setor industrial. Explora-se ainda a evolução da digitalização no contexto europeu e português, destacando políticas e estratégias que sustentam esta transição. Por fim, são detalhadas as ferramentas de MC, organizadas por tipologia, bem como as principais barreiras à sua implementação no atual cenário. Este capítulo estabelece assim uma base de conhecimento de suporte à análise crítica dos resultados da RSL.

3.1. Indústria 4.0 e a sua Evolução

A compreensão da Indústria 4.0 exige, antes de mais, o enquadramento da sua origem no processo histórico de evolução industrial. Desde o século XVIII, o setor industrial tem atravessado sucessivas revoluções tecnológicas que alteraram profundamente as formas de produção, organização do trabalho e a estrutura económica das sociedades (Hermann et al., 2015). Estas transformações são classificadas em quatro grandes fases: Indústria 1.0, 2.0, 3.0 e 4.0, conforme apresentado na Figura 9.

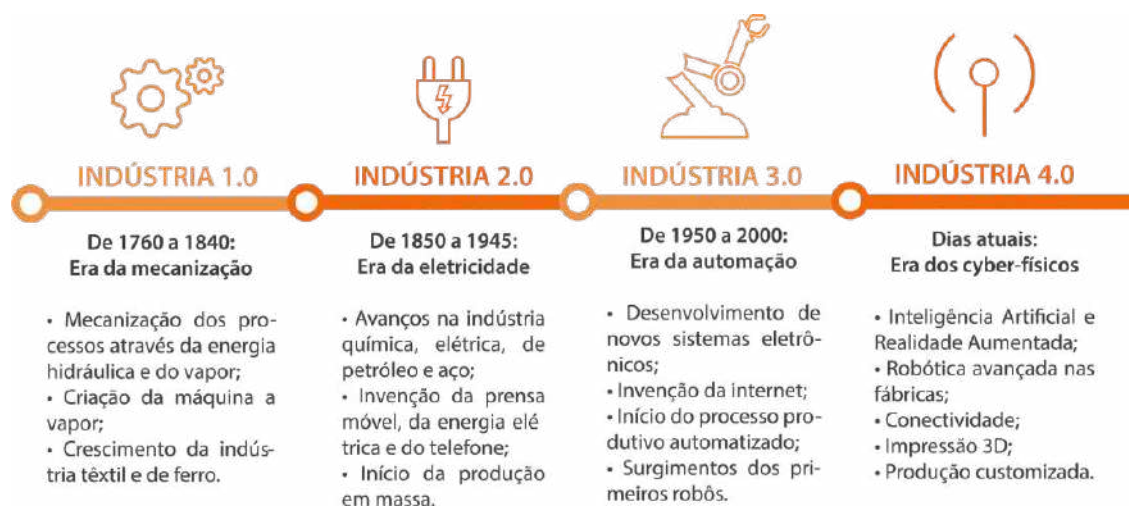


Figura 9: Eras da evolução industrial (SENAI, 2019).

3.1.1. Indústria 1.0 – A Revolução Mecânica

A primeira revolução industrial, ocorrida entre o final do século XVIII e o início do século XIX, foi impulsionada pela introdução da máquina a vapor e pela mecanização da produção. Este período marcou a transição de uma economia predominantemente agrária e artesanal para um modelo industrial baseado na utilização de energia mecânica e na concentração da produção em fábricas (Coleman et al., 1991). Nesta fase surgiram as primeiras indústrias têxteis, metalúrgicas e de transportes, com destaque para o desenvolvimento das locomotivas e sistemas ferroviários.

3.1.2. Indústria 2.0 – Produção em Massa e Eletrificação

A segunda era da revolução industrial, iniciada na segunda metade do século XIX, ficou marcada pela eletrificação das fábricas, pelo surgimento da linha de montagem e pela aplicação de princípios científicos ao trabalho (como por exemplo, o Taylorismo e o Fordismo). Esta fase permitiu ganhos exponenciais de produtividade, deu origem à produção em massa e consolidou o papel da indústria como pilar do crescimento económico (Hounshell, 1985). A padronização e a divisão do trabalho permitiram uma maior eficiência das tarefas operacionais.

3.1.3. Indústria 3.0 – Automação e Tecnologias da Informação

Na segunda metade do século XX, emergiu a terceira revolução industrial, caracterizada pela introdução de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), robótica e automação nos processos produtivos. Esta fase introduziu os *Programmable Language Controllers* (PLC) e os primeiros Sistemas Computorizados de Produção (CIM), o que permitiu uma maior flexibilidade na configuração das linhas de fabrico (Kagermann et al., 2013). A integração de sistemas computacionais nas operações industriais representou um avanço significativo na eficiência, eficácia e controlo da qualidade.

3.1.4. Indústria 4.0 – Sistemas Ciberfísicos e Fábricas Inteligentes

A Indústria 4.0, também conhecida como a quarta Revolução Industrial, representa uma nova fase no desenvolvimento do setor industrial, caracterizada pela fusão entre tecnologias físicas e digitais, com impacto transversal nos processos produtivos, modelos de negócio e estruturas organizacionais (Liao et al., 2017).

Este conceito surgiu formalmente em 2011, na Alemanha, como parte de uma estratégia nacional para modernizar a indústria de manufatura e, rapidamente, ganhou relevância a nível global.

Ao contrário das revoluções industriais anteriores, a Indústria 4.0 não se limita à simples automatização de tarefas mecânicas, mas caracteriza-se pela integração de *Cyber-Physical Systems* (CPS), nos quais elementos físicos e digitais estão interligados e interagem em tempo real (Frank et al., 2019). Estes sistemas são suportados por redes inteligentes e sensores distribuídos, promovendo a autonomia, a monitorização contínua e a tomada de decisão descentralizada. A conectividade entre máquinas, produtos, operadores e plataformas digitais é assegurada pela *Internet Of Things* (IoT), permitindo a criação de ambientes de produção responsivos e interligados. Neste contexto, a Indústria 4.0 sustenta-se num ecossistema tecnológico avançado que combina automação inteligente, conectividade e capacidade analítica, com o objetivo de melhorar os processos produtivos e aumentar a flexibilidade operacional (Frank et al., 2019).

A Figura 10 sintetiza esquematicamente um conjunto de tecnologias associadas à Indústria 4.0. Estas tecnologias, frequentemente designadas como tecnologias habilitadoras, desempenham um papel essencial na transformação dos sistemas de produção tradicionais em ambientes inteligentes, interligados e adaptativos. A sua aplicação permite não só a automação e digitalização dos processos, mas também a capacidade de resposta em tempo real, a personalização em massa e a MC da eficiência operacional (Oztemel & Gursev, 2020).



Figura 10: Conjunto de tecnologias da Indústria 4.0 (Indústria 4.0, 2021).

A digitalização dos processos produtivos gera ganhos de produtividade, redução de desperdícios e maior personalização de produtos, mas também levanta desafios quanto à privacidade de dados, segurança cibernética e substituição de empregos tradicionais por funções mais técnicas (Müller et al., 2018). Neste sentido, é essencial que a transição para este novo modelo seja acompanhada por políticas públicas, programas de requalificação profissional e regulamentações adequadas.

3.2. Tecnologias Digitais da Indústria 4.0

No âmbito da Indústria 4.0, diferentes tecnologias têm permitido o controle e integração de processos produtivos, fomentando a automação e os ganhos significativos de eficiência e flexibilidade operacional. Estas tecnologias configuram-se como vetores de transformação industrial, promovendo a inteligência distribuída, a sustentabilidade e a criação de ecossistemas produtivos inteligentes, altamente conectados e integrados.

Entre as tecnologias mais relevantes destacam-se os sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), os quais demonstram ser essenciais na supervisão e comando de infraestruturas, utilizando sistemas PLC, visualizados através de *Human Machine Interface* (HMI) inteligentes. No entanto, aumentaram os riscos de ciberataques.

Bajwa et al. (2025) identificam vulnerabilidades recorrentes, relacionadas com débeis processos de autenticação e utilização de protocolos inseguros. Estes propõem abordagens baseadas em AI para deteção de ameaças, complementadas por *frameworks* modulares aplicáveis em ambientes de teste com redes SCADA e IoT. De igual forma, Storm et al. (2024) demonstraram, em ambiente real com *hardware*, a eficácia de diferentes sistemas de deteção de intrusão industrial ao aplicarem ataques simulados em redes SCADA de subestações elétricas, destacando as variações de desempenho.

No domínio dos PLC avançados, a tendência atual centra-se na virtualização dessas unidades de controle, uma vez que permitem maior flexibilidade, implantação dinâmica e recuperação automática após falhas, especialmente em contextos industriais críticos como instalações químicas e sistemas de transporte público (Skrodelis et al., 2024).

Os *Distributed Control Systems* (DCS) evoluem para ambientes híbridos, que combinam controladores distribuídos, *Industrial Internet of Things* (IIoT), *edge computing* e protocolos seguros, garantindo elevada disponibilidade em processos contínuos (Gupta, 2024).

As HMI inteligentes passaram de painéis operacionais a interfaces ricas, integradas com SCADA, PLC e robótica colaborativa (*cobots*). Estas HMI utilizam gráficos em tempo real, sistemas de alarme com priorização automática e AI para sugerir ações baseadas em dados, promovendo maior eficiência operacional (Zami et al., 2024).

A robótica colaborativa (*cobots*) destaca-se pela capacidade de colaboração segura com trabalhadores humanos em linhas de montagem, inspeção e logística. Integrados com sensores de visão 2D/3D e algoritmos de visão computacional, os *cobots* são capazes de identificar defeitos, com precisão superior a 99%, e podem integrar-se com SCADA e PLC para adaptação automática dos processos (Zami et al., 2024).

No domínio da IIoT, os sensores inteligentes e atuadores conectados integram capacidades de processamento local, diagnóstico e comunicação. Os *gateways* IIoT desempenham um papel fundamental, traduzindo protocolos industriais, assegurando encriptação e filtragem de dados, e implementando mecanismos de autenticação robustos (Gupta, 2024).

Plataformas de gestão IIoT oferecem soluções *cloud* para armazenamento e análise de dados industriais, permitindo a criação de *digital twins*, execução de análises preditivas e integração com sistemas empresariais como ERP e MES. Embora a literatura de acesso aberto sobre plataformas comerciais específicas seja escassa, estudos demonstram como arquiteturas *cloud-edge* sustentam estas aplicações (Zami et al., 2024).

Os sistemas de rastreamento baseados em tecnologia *Radio Frequency Identification* (RFID) e as tecnologias de localização, como *Ultra Wide Band* (UWB) e *Global Positioning System* (GPS), são amplamente utilizados para rastreabilidade de ativos, muitas vezes integrados com *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) e tecnologias *blockchain* para reforçar a segurança e a transparência em cadeias logísticas complexas (Zami et al., 2024).

O *edge computing* permite o processamento local de dados, reduzindo o consumo de largura de banda nas comunicações com a *cloud*, enquanto o *cloud computing* assegura escalabilidade e capacidade de análise intensiva, com crescentes preocupações de segurança e privacidade (Zami et al., 2024).

No âmbito da análise de dados e AI, o *big data analytics* agrega dados provenientes de sensores industriais, PLC e sistemas SCADA, permitindo a monitorização de processos, deteção de anomalias e otimização do desempenho operacional (Skrodelis et al., 2024).

O *machine learning*, em particular, é cada vez mais utilizado para manutenção preditiva, através de modelos avançados (Zemskov et al., 2024).

Digital twins são modelos virtuais que reproduzem o comportamento de sistemas físicos, atualizados em tempo real com dados de sensores e sistemas IIoT. São amplamente aplicados em setores como manufatura, energia, transporte, agricultura, saúde, espaço e robótica. O estudo destaca os desafios de segurança e privacidade em camadas física, digital, de comunicação e interface, fornecendo taxonomias e caminhos de investigação futura (Zami et al., 2024).

Os sistemas de visão computacional são amplamente utilizados para inspeção automatizada de qualidade, detetando defeitos em produtos e processos industriais, muitas vezes integrados com *cobots* e PLC. Os algoritmos de otimização, incluindo algoritmos genéticos e heurísticas, são aplicados à gestão da produção, logística e consumo energético, geralmente integrados com *digital twins* em arquiteturas baseadas em *edge* e *cloud* (Zami et al., 2024).

Na integração de sistemas, destacam-se os MES, que monitorizam e controlam a execução das operações no chão de fábrica, os sistemas ERP, que consolidam informações financeiras, operacionais e logísticas, e os sistemas *Product Lifecycle Management* (PLM), que gerem o ciclo de vida dos produtos desde a concepção até à manutenção, frequentemente integrados com blockchain e IIoT (Zami et al., 2024).

As API industriais e os protocolos de comunicação, asseguram a interoperabilidade e a comunicação entre equipamentos industriais e sistemas digitais, permitindo o fluxo de informação em tempo real e a integração de dispositivos heterogêneos. Assim, é necessário um mecanismo para facilitar a interligação entre sistemas e plataformas baseadas em IIoT e *digital twins*, garantindo escalabilidade, modularidade e resiliência na arquitetura digital das organizações (Gupta, 2024).

No campo da cibersegurança industrial, destacam-se práticas e tecnologias como a utilização de *firewalls* industriais, sistemas de detecção de intrusão baseados em AI, autenticação multifatorial, plataformas de monitorização em tempo real, bem como sistemas de gestão de vulnerabilidades e mecanismos de *backup* e recuperação. Estas soluções visam assegurar a continuidade operacional, proteger a integridade dos dados e reforçar a resiliência cibernética contra ameaças crescentes nos ambientes SCADA e IIoT (Storm et al., 2024).

Por fim, no domínio das tecnologias de manufatura avançada, a manufatura aditiva (impressão 3D industrial) possibilita a produção personalizada e descentralizada de peças complexas com elevada precisão.

A *Augmented Reality* (AR) e a *Virtual Reality* (VR) são cada vez mais utilizadas em operações de manutenção assistida, formação imersiva e prototipagem digital, contribuindo para a redução de erros e o aumento da eficiência. *Automated Guided Vehicle* (AGV) e *drones* desempenham funções logísticas e de inspeção autónomas, enquanto as soluções baseadas em *blockchain* promovem a rastreabilidade e a integridade dos dados ao longo das cadeias de valor industriais, oferecendo transparência e segurança em ecossistemas colaborativos (Zami et al., 2024).

3.3. Caracterização dos Processos e Operações da Indústria 4.0

Na era da Indústria 4.0, os processos e operações industriais são caracterizados por um elevado grau de conectividade, automatização e inteligência distribuída, suportados por um ecossistema digital que interliga pessoas, máquinas, sensores e sistemas de informação ao longo de toda a cadeia de valor. Estes processos deixam de ser sequenciais e reativos para se tornarem integrados, adaptativos e proativos, alicerçados na recolha, processamento e análise em tempo real de grandes volumes de dados operacionais (*big data*), provenientes de diversas fontes (Wamba et al., 2015). A IoT e os CPS constituem os pilares dessa transformação, permitindo a criação de fábricas inteligentes capazes de monitorizar o seu próprio estado, prever falhas, ajustar parâmetros de produção automaticamente e comunicar com outros sistemas internos e externos (Lee et al., 2015).

As operações de produção, em particular, evoluíram de modelos centrados na eficiência de massa para sistemas flexíveis de produção personalizada, baseados em arquiteturas modulares e linhas de fabrico reconfiguráveis. O conceito de personalização em massa (*mass customization*) é operacionalizado através da integração de tecnologias como manufatura aditiva, robótica colaborativa e planeamento avançado suportado por algoritmos de AI (Zhong et al., 2017). Isto permite responder de forma mais ágil às exigências do mercado, reduzindo tempos de ciclo e melhorando o aproveitamento de recursos.

A gestão da qualidade também é profundamente impactada pela digitalização industrial, através da adoção de sistemas inteligentes de inspeção baseados em visão computacional, sensores integrados e análise preditiva. A recolha contínua de dados críticos dos processos permite o controlo estatístico em tempo real, a deteção precoce de anomalias e a implementação automática de ações corretivas.

As inovações na base do conceito de Qualidade 4.0, que promove uma abordagem mais proativa, conectada e orientada por dados para garantir elevados padrões de desempenho e conformidade (Sony et al., 2020).

No domínio da manutenção industrial, destaca-se a transição de modelos corretivos e preventivos para abordagens de manutenção preditiva, apoiadas em análise de dados e algoritmos de *machine learning*, que antecipam avarias com base em padrões de comportamento e condições reais de funcionamento dos ativos. Esta mudança contribui para uma maior disponibilidade dos equipamentos, redução de paragens não planeadas e otimização dos custos operacionais (Lee et al., 2015).

Por outro lado, a Logística e a cadeia de abastecimento estão a tornar-se cada vez mais digitais, integradas e visíveis em tempo real, impulsionadas por tecnologias como RFID, *blockchain* e sistemas avançados de planeamento. Esta conectividade otimiza o rastreamento de mercadorias, melhora a previsão da procura e sincroniza os fluxos logísticos de forma eficiente, promovendo maior resiliência, transparência e sustentabilidade na gestão da cadeia de abastecimento (Varriale et al., 2021).

A implementação eficaz da Indústria 4.0 exige mais do que a mera adoção de tecnologias digitais avançadas: requer uma transformação organizacional e cultural profunda, centrada na articulação equilibrada entre sistemas inteligentes e o fator humano. Em ambientes produtivos cada vez mais automatizados, a colaboração entre humanos e robôs desempenha um papel crucial na criação de fábricas inteligentes, sendo fundamental garantir a complementaridade de competências entre operadores e tecnologias. Esta integração só é bem-sucedida quando acompanhada por estratégias de capacitação contínua, orientadas para o desenvolvimento de competências digitais, cognitivas e colaborativas por parte dos trabalhadores industriais (Othman & Yang, 2023).

3.4. Transição e Transformação Digital

A compreensão da transição digital exige uma distinção clara entre os conceitos de associados à transformação digital (*digital transformation*), frequentemente utilizados de forma ambígua na literatura, mas que correspondem a estágios distintos de maturidade tecnológica e organizacional. Importa assim iniciar esta secção com a distinção do conceito de digitização (*digitization*) e digitalização (*digitalization*).

A digitização refere-se ao processo técnico de conversão de informação analógica em formato digital. Neste processo, os dados não são modificados, mas apenas convertidos para uma representação binária passível de ser armazenada e transmitida eletronicamente. Esta é uma etapa inicial do processo de transformação digital das empresas, podendo gerar ganhos de eficiência operacional, apesar não alterarem estruturalmente os processos ou modelos de negócio existentes (The Economist, 2019).

A digitalização representa uma etapa subsequente, em que os dados digitalizados passam a ser utilizados para automatizar e melhorar a execução das tarefas e fluxos de trabalho. Esta fase corresponde à aplicação de tecnologias digitais para melhorar a produtividade, eficiência e qualidade dos processos, sem, contudo, alterar substancialmente a natureza do negócio. Por exemplo, a integração de sensores e plataformas digitais na monitorização da produção, ou a utilização de sistemas ERP para controlo de inventário, são formas típicas de digitalização. De acordo com GEP (2022), trata-se de uma evolução funcional que permite fazer o mesmo de forma mais rápida, segura e eficaz, mas sem criar novos modelos de negócio.

Já a transformação digital vai mais além, sendo definida como um processo estratégico e disruptivo, que redefine a proposta de valor das organizações, alterando profundamente a sua cultura, estrutura e modo de operar. Neste contexto, as empresas adotam, não só, tecnologias avançadas, mas revêm os seus processos, relações com o cliente, formas de entrega de valor e até os seus modelos de negócio fundamentais (Bughin et al., 2018). A transformação digital é assim um processo muitas vezes incremental, com o objetivo final adaptar a organização aos desafios e oportunidades da era digital. Na transformação digital, diversas tecnologias são integradas nos modelos de negócio existentes, promovendo uma verdadeira mudança organizacional (McKinsey Insights, 2024). A transformação digital é mais bem-sucedida se for implementada numa ótica de processo contínuo e progressivo, que se inicia com a digitalização técnica, avança com a digitalização funcional e culmina na transformação estratégica e estrutural do negócio.

No setor industrial, este percurso manifesta-se, por exemplo, na migração de registos manuais para sistemas digitais (digitização), na automatização de processos com sensores e sistemas integrados (digitalização), e finalmente na reconfiguração de toda a cadeia de valor com base em dados, AI e conectividade (transformação digital).

A distinção entre estes conceitos é essencial para clarificar o estágio de maturidade digital das organizações e para estruturar intervenções adequadas às suas necessidades específicas (McKinsey Insights, 2024).

3.4.1. Evolução da Transformação Digital no Contexto Europeu

A transformação digital é considerada, no contexto da UE, um pilar estratégico para a competitividade, sustentabilidade e resiliência do espaço económico europeu. Reconhecendo o seu potencial para modernizar a indústria, dinamizar o emprego qualificado e acelerar a transição ecológica, a Comissão Europeia tem vindo a desenvolver uma agenda digital ambiciosa, centrada na soberania tecnológica e na capacitação digital da sociedade. Em 2021, foi apresentada a "Década Digital da Europa", que estabelece metas concretas para 2030 nos domínios da conectividade, competências digitais, digitalização das empresas e serviços públicos, com o objetivo de posicionar a Europa como líder global na economia digital (Parlamento Europeu, 2021). Neste contexto, destaca-se o papel dos mecanismos de Recuperação e Resiliência, que financiam reformas estruturais e investimentos em tecnologias digitais, com especial foco nas PME, consideradas fundamentais para a inovação e coesão territorial. A digitalização é também considerada uma alavanca essencial para alcançar os objetivos do Pacto Ecológico Europeu, nomeadamente através da promoção de modelos de produção mais eficientes, circulares e baseados em dados. Assim, a transformação digital assume-se não só como um vetor de modernização tecnológica, mas como um instrumento de integração económica, inclusão social e transição justa, o qual deve ser alinhado com os valores fundacionais da UE (Parlamento Europeu, 2021).

A nível industrial, a UE incentiva a adoção de tecnologias emergentes – como AI, computação de alto desempenho e *blockchain* – integradas em estratégias de digitalização avançada, nomeadamente, através de iniciativas como os *Digital Innovation Hubs* e as Parcerias Europeias em Tecnologias Digitais e Industriais. Estes mecanismos visam acelerar a transformação digital das empresas industriais, com foco na capacitação digital da força de trabalho, na segurança dos dados e na interoperabilidade entre sistemas, assegurando a autonomia estratégica do setor industrial (Parlamento Europeu, 2021).

3.4.2. Evolução da Transformação Digital no Contexto Português

Em Portugal, a transformação digital tem vindo a assumir um papel cada vez mais relevante na estratégia de modernização do tecido empresarial e da administração pública. Nos últimos anos, o país registou progressos significativos na digitalização dos serviços públicos, na transição digital das PME e na adoção de tecnologias emergentes, em especial nos setores do comércio, indústria e logística.

De acordo com Casimiro (2024), o contexto nacional tem evoluído de uma fase inicial centrada na digitalização de processos administrativos para uma nova etapa em que a tecnologia é integrada como parte estrutural do modelo de negócio e da experiência do cliente. Contudo, o autor sublinha que persistem desafios estruturais, como representado na Figura 11, nomeadamente a escassez de competências digitais, a fraca interoperabilidade entre sistemas empresariais e o défice de investimento tecnológico por parte de muitas organizações.

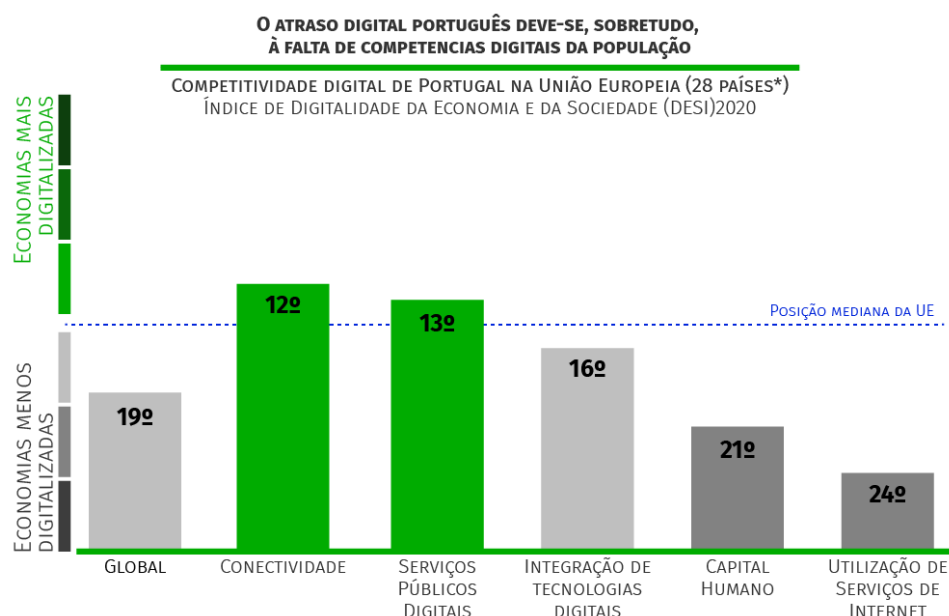


Figura 11: Representação das competências digitais em Portugal (Lucas et al., 2021).

A transformação digital em Portugal continua a ser percecionada como uma iniciativa de índole exclusivamente tecnológica, quando, na realidade, requer uma mudança cultural profunda, que envolva liderança transformacional, estratégias de gestão da mudança, requalificação contínua dos recursos humanos e um reposicionamento estratégico sustentado (Lucas et al., 2021).

Neste sentido, importa destacar que a transição digital não se concretiza apenas pela introdução de infraestruturas avançadas ou pela adoção de sistemas inteligentes; depende, acima de tudo, das pessoas. Apesar dos indicadores positivos ao nível da conectividade e da cobertura de fibra ótica, o panorama nacional continua a revelar um défice crítico de literacia e qualificação digital. Segundo o INE (2024), cerca de 30% da população entre os 16 e os 74 anos não utilizou a Internet em 2023, e apenas 56% possui competências digitais básicas ou superiores.

A percentagem de especialistas em tecnologias da informação e comunicação em Portugal situava-se nos 4,5%, ligeiramente abaixo da média europeia. Este cenário evidencia uma lacuna estrutural na componente humana da transformação digital, frequentemente negligenciada em detrimento de investimentos predominantemente tecnológicos. A verdadeira digitalização exige, portanto, uma aposta clara e estratégica na qualificação de pessoas, integrando competências digitais nos currículos do ensino básico, secundário e superior, bem como promovendo a aprendizagem contínua no contexto profissional, sobretudo entre gestores e decisores (Kralj, 2024).

Programas como o Plano de Ação para a Transição Digital, o Portugal Digital e o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) têm procurado colmatar estas lacunas, incentivando a digitalização e a inovação no tecido empresarial. Todavia, para que estas iniciativas se traduzam em ganhos sustentáveis de produtividade, competitividade e agilidade, é indispensável garantir que o capital humano acompanha o ritmo da mudança. A ausência de investimento na capacitação das pessoas compromete não só a eficácia das tecnologias implementadas, mas também a própria capacidade das organizações de se adaptarem e inovarem. Assim, a transição digital em Portugal deverá ser entendida como um processo sistémico e multidimensional, onde a tecnologia é um meio, mas as pessoas são o verdadeiro motor da mudança (Deloitte, 2023).

3.5. Melhoria Contínua

A MC constitui um dos pilares fundamentais da gestão da qualidade e da excelência operacional nas organizações industriais, sustentando-se na ideia de que os processos podem e devem ser constantemente aperfeiçoados. Trata-se de uma abordagem sistemática que visa incrementar, de forma sustentada, a eficiência, a eficácia e a flexibilidade organizacional, através da eliminação de desperdícios, da redução da variabilidade e da promoção da aprendizagem coletiva (Oakland, 2014). Esta filosofia assume especial relevância no atual contexto de transformação digital e crescente competitividade global, onde, quer a capacidade de adaptação como a inovação constituem uma vantagem estratégica (Bernard et al., 2025).

O conceito de MC tem raízes na cultura de gestão Japonesa, nomeadamente no *Toyota Production System* (TPS), desenvolvido no pós-Segunda Guerra Mundial. Entre os seus pilares fundamentais destaca-se o *Kaizen*, termo que significa literalmente “melhoria” ou “mudança para melhor”.

Mais do que um conjunto de técnicas, trata-se de uma filosofia de gestão e de trabalho, centrada na realização de melhorias graduais e contínuas, com o envolvimento de todos os níveis da organização (Oakland, 2014).

Este princípio defende que os trabalhadores da linha de produção são uma fonte privilegiada de conhecimento sobre os processos e, como tal, devem participar ativamente na identificação de problemas e na proposta de soluções (Imai, 1986).

No âmbito da filosofia de MC, as organizações recorrem a um conjunto diversificado de ferramentas que, quando aplicadas de forma estruturada, contribuem para o aumento da eficiência operacional, da qualidade e da satisfação do cliente. Estas ferramentas podem ser agrupadas em categorias funcionais consoante o seu objetivo principal: desde a organização básica do local de trabalho, passando pela resolução de problemas, até à gestão de indicadores e processos. Nas subsecções que se seguem apresentam-se algumas das principais ferramentas que são aplicadas no âmbito da MC. Não obstante o agrupamento classificativo apresentado, estas podem ser incluídas noutras categorias, de acordo com o objetivo de aplicação.

3.5.1. Ferramentas de Padronização de Operações

As ferramentas básicas são genericamente ferramentas usadas para a padronização das operações e constituem a fundação da MC. Estas visam criar um ambiente propício à eficiência e disciplina organizacional. A ferramenta 5S, apresentada na Figura 12, é uma ferramenta de origem japonesa que promove a organização, padronização e disciplina no local de trabalho através de cinco etapas: *Seiri* (utilização), *Seiton* (organização), *Seiso* (limpeza), *Seiketsu* (padronização) e *Shitsuke* (disciplina).



Figura 12: Representação dos princípios da ferramenta 5S (Nonato, 2023).

A implementação da ferramenta 5S tem como principais vantagens a melhoria da segurança, a redução do tempo de procura de materiais e o aumento da motivação dos colaboradores. Estudos em ambiente hospitalar e laboratorial demonstraram reduções significativas de erros e melhorias na eficiência operacional (Kanabar et al., 2024).

O *Kaizen*, por sua vez, assenta na ideia de MC através de pequenos ajustes incrementais e constantes, promovendo o envolvimento de todos os níveis hierárquicos. As suas vantagens incluem o estímulo à cultura participativa, a adaptação rápida às mudanças e a eliminação gradual de desperdícios (Kanabar et al., 2024).

O *Kanban* é uma ferramenta visual utilizada para sinalizar o estado de cada etapa de um processo produtivo ou de serviços, permitindo o controlo do fluxo e a reposição de *stock* apenas quando necessário. Entre os seus benefícios destacam-se a redução de inventários e o aumento da transparência entre equipas (Alsyouf et al., 2011).

Associado a este, o JIT visa sincronizar a produção com a procura real do cliente, eliminando a produção em excesso. A sua aplicação em ambientes industriais tem demonstrado elevada eficácia na redução de custos e melhoria do tempo de resposta (Alsyouf et al., 2011).

A Gestão Visual apoia-se na utilização de elementos visuais como painéis, semáforos e gráficos para comunicar o estado de processos em tempo real. A visibilidade imediata facilita a deteção de desvios e a tomada de decisões (Bevan et al., 2005). A Gestão Visual está muitas vezes associada ao conceito de *Standard Work*. O *Standard Work* é um conceito fundamental que estabelece a forma mais eficiente, segura e consistente de realizar uma atividade ou operação. Envolve a documentação do melhor método conhecido para executar um processo, incluindo a sequência de etapas, o *takt time* e os materiais e ferramentas necessários. Ao padronizar o trabalho, as organizações garantem consistência na qualidade e no desempenho e aumentam a segurança. O *Standard Work* serve como uma referência que pode ser revista à medida que métodos melhores são encontrados.

O ciclo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA), representado na Figura 13, estrutura a MC em quatro etapas cíclicas: planeamento, execução, verificação e ação corretiva, permitindo a experimentação controlada de mudanças antes da sua consolidação. A aplicação do PDCA representa uma abordagem sistemática, promovendo um método estruturado para a identificação e solução de problemas. Este permite não apenas a implementação de melhorias, mas também a sua padronização, garantindo consistência e estabilidade nos processos, a redução de desperdícios e retrabalho e o aumento da eficiência operacional (Bevan et al., 2005).



Figura 13: Representação do Ciclo PDCA (ZUP, 2020).

3.5.2. Ferramentas de Diagnóstico de Problemas e de Qualidade

As ferramentas de diagnóstico e de análise de problemas têm como finalidade identificar as causas de anomalias e apoiar a sua resolução estruturada. A técnica dos *5 Whys* propõe uma abordagem iterativa, na qual se questiona “o porquê?” até ser encontrada a causa-raiz do problema. Esta simplicidade permite a sua aplicação por qualquer colaborador e é particularmente útil na eliminação de problemas operacionais no (Bevan et al., 2005).

O Diagrama de *Ishikawa*, também conhecido como espinha de peixe e representado na Figura 14, categoriza de forma visual os diversos fatores que podem originar um problema, facilitando a análise sistêmica.

As seis categorias do Diagrama de *Ishikawa*, conhecidas como os 6M, ajudam a organizar as possíveis causas de um problema. Máquina refere-se a falhas ou limitações nos equipamentos utilizados; Método envolve procedimentos inadequados ou mal definidos; Mão-de-obra considera fatores relacionados com a capacitação das pessoas; Material abrange a qualidade e a adequação das matérias-primas utilizadas; Meio ambiente inclui fatores externos e condições do local de trabalho que possam influenciar o trabalho; e Medição diz respeito à precisão e confiabilidade dos instrumentos de controlo e análise. Essas categorias facilitam uma análise completa e estruturada das causas de um problema (Alsayouf et al., 2011).

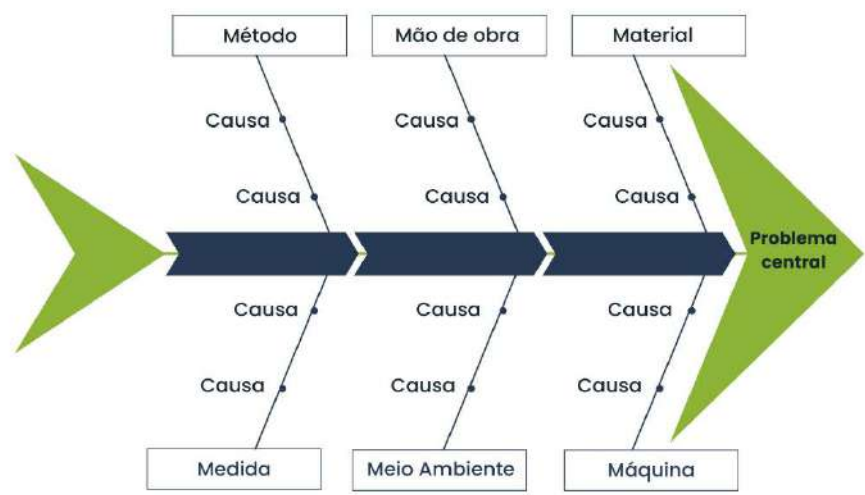


Figura 14: Representação do Diagrama Ishikawa (Cruz, 2024).

Já o Diagrama de Pareto, baseado no princípio 80/20, identifica os poucos fatores vitais que geram a maioria dos efeitos, auxiliando a priorização de ações corretivas (Alkiayat, 2021).

Com origem no sistema TPS, a ferramenta A3, representada na Figura 15, guia a resolução estruturada de problemas num único documento A3, promovendo o pensamento crítico, o alinhamento de equipas e a clareza na comunicação de propostas de melhoria (Bevan et al., 2005).

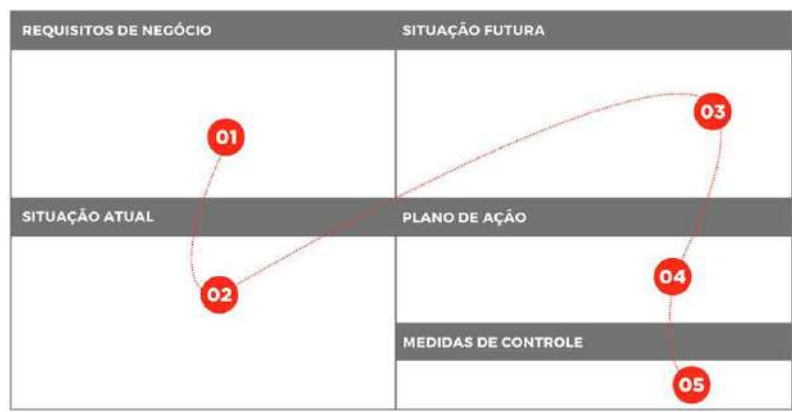


Figura 15: Representação da ferramenta. Adaptado de Pinto (2024).

O *Six Sigma*, focado na redução da variabilidade e defeitos, utiliza ferramentas estatísticas para alcançar níveis de qualidade superiores, frequentemente complementado pelo ciclo *Define, Measure, Analyze, Improve, Control* (DMAIC) (Bevan et al., 2005).

O DMAIC, cujas fases são apresentadas na Figura 16, é uma metodologia associada do *Six Sigma* que orienta melhorias complexas baseadas em dados. A sua aplicação sistemática permite reduzir a variabilidade dos processos, melhorar o desempenho e consolidar resultados de forma sustentável (Bevan et al., 2005). A sua abordagem estruturada permite identificar causas raízes, reduzir variações, eliminar desperdícios, e aumentar a eficiência. Além disso, melhora a qualidade dos produtos ou serviços, e contribui para aumentar a satisfação do cliente e reduzir custos operacionais, apoiando a cultura da MC.



Figura 16: Representação do Ciclo DMAIC do *Six Sigma* (Minetto, 2018).

No domínio das ferramentas de qualidade e gestão, o *Total Quality Management* (TQM), apresentado na Figura 17, propõe uma abordagem holística à qualidade, envolvendo toda a organização e promovendo a MC com base no cliente (C. Chen et al., 2022).



Figura 17: Representação dos princípios do TQM (TQM, 2019).

O conceito de *Jidoka* introduz a inteligência na automação, permitindo a detecção e paragem imediata em caso de anomalia, o que garante a qualidade desde a origem. O conceito de *Jidoka* integra automação com o julgamento humano (*autonomation*) para melhorar a qualidade e a eficiência, capacitando máquinas e operadores a detetar anomalias e interromper imediatamente a produção. Esta paragem imediata evita a propagação de erros e permite uma intervenção rápida para solucionar a causa raiz dos problemas. Após a detecção, são tomadas ações corretivas para resolver a questão na sua origem, garantindo que itens defeituosos não avancem na produção. O *Jidoka* enfatiza a MC por meio da implementação de contramedidas sistemáticas, como dispositivos à prova de erros e modificações no processo, para prevenir a recorrência dos mesmos problemas. Assim, estes princípios promovem um ambiente de produção que prioriza a prevenção de defeitos e a otimização contínua dos processos, levando, em última análise, a uma maior qualidade do produto.

O *Poka Yoke* consiste em mecanismos que previnem ou sinalizam erros antes que estes ocorram, como mostra a Figura 18, garantindo que os produtos ou processos não avancem com defeitos. Exemplos incluem conectores que só encaixam numa posição ou sensores que bloqueiam operações incorretas.

Esta abordagem reduz drasticamente a necessidade de retrabalho e promove a qualidade na fonte (Smętkowska & Mrugalska, 2018).



Figura 18: Representação ferramenta *Poka-Yoke*. Adaptado de Pinto (2024).

O *Andon*, representado na Figura 19, é um sistema de sinalização visual e/ou sonora que alerta para problemas no processo, permitindo intervenção rápida e evitando a propagação de erros.



Figura 19: Representação do sistema *Andon*. Adaptado de Pinto (2024).

O Controlo Estatístico de Processos (CEP) é uma metodologia de gestão da qualidade que usa ferramentas estatísticas para controlar e analisar processos produtivos. O seu principal objetivo é detetar a variabilidade nos processos, garantindo que os produtos sejam fabricados dentro das especificações de qualidade exigidas. O CEP permite distinguir entre variações inerentes ao processo e variações causadas por fatores externos e que não podem ser explicados por causas aleatórias.

A principal ferramenta utilizada são as cartas de controlo, que permitem acompanhar o desempenho do processo ao longo do tempo e identificar desvios antes que eles resultem em defeitos ou conformidades graves. A aplicação do CEP conduz à redução de desperdícios, retrabalho e custos, ao mesmo tempo que promove a MC e aumenta a eficiência dos processos de produção (Bevan et al., 2005).

3.5.3. Ferramentas de Análise de Fluxo de Processo

As ferramentas de análise de fluxo de processo são centrais na gestão *Lean* e visam a melhoria do ritmo e estabilidade produtiva.

O *Value Stream Mapping* (VSM) é uma ferramenta analítica que permite mapear o fluxo de valor de um processo, identificando etapas que agregam e não agregam valor. A sua principal vantagem reside na capacidade de revelar desperdícios ocultos e apoiar decisões estratégicas para o redesenho de processos (Bevan et al., 2005). Já o *Standard Work* formaliza as melhores práticas operacionais através da definição de sequências padronizadas de tarefas, promovendo a uniformidade do desempenho e facilitando o treino de novos operadores (Santos et al., 2006).

O *Single-Minute Exchange of Die* (SMED) é uma ferramenta desenvolvida para reduzir significativamente o tempo de troca de equipamentos (*changeover*) e/ou preparação de máquina, idealmente para menos de dez minutos, aumentando assim a flexibilidade e eficiência da produção. Originada no TPS, o SMED diferencia entre tarefas de *setup* interno, que exigem a interrupção da máquina, e tarefas de *setup* externo, que podem ser realizadas enquanto a máquina está em operação. O objetivo principal é converter atividades de *setup* interno em externo, melhorar todos os processos de troca e eliminar etapas que não agregam valor. Essa redução no tempo facilita a produção em lotes de menor quantidade, reduz os níveis de inventário e apoia os princípios da produção JIT. Ao reduzir os tempos de *setup* e trocas de ferramentas, o SMED permite aumentar a flexibilidade e a capacidade de resposta às mudanças de produto (Alsyouf et al., 2011).

A TPM, conforme pilares representados na Figura 20, promove a responsabilidade partilhada pela manutenção entre operadores e técnicos, com foco na eliminação de perdas por falhas, micro-paragens e *setups* demorados. A sua implementação tem mostrado aumentos consideráveis na disponibilidade dos equipamentos e na motivação das equipas (Alsyouf et al., 2011).

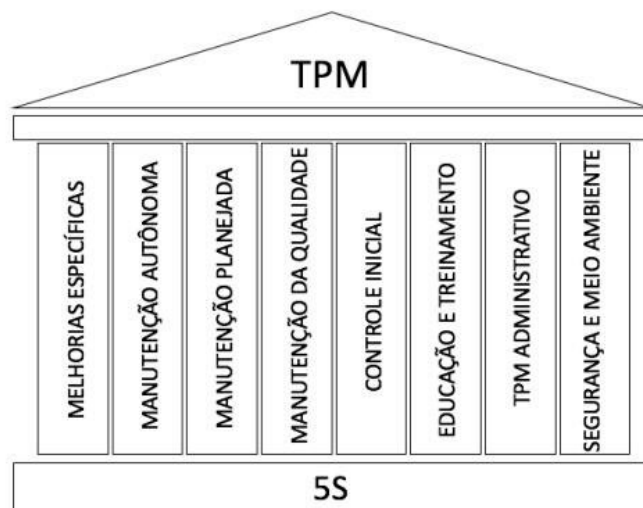


Figura 20: Representação da ferramenta do TPM (Silva & Silva, 2023).

O *Heijunka* é um sistema de nivelamento da produção que permite equilibrar a carga de trabalho e reduzir a variabilidade, mitigando o risco de sobrecarga de recursos e melhorando a previsibilidade do fluxo. O objetivo é reduzir a irregularidade na produção distribuindo o trabalho de forma equilibrada ao longo do tempo, em vez de produzir em grandes lotes.

O *Heijunka* permite a programação da produção de lotes menores, de forma a balancear a carga de trabalho para operadores e máquinas, reduzir inventário e tempos de espera e minimizar a superprodução e desperdícios. Ao nivelar a produção, as empresas reduzem o esforço excessivo dos seus recursos, possibilitando um fluxo constante de produtos e aumentando a flexibilidade para responder à demanda do cliente (Alsyouf et al., 2011).

3.5.4. Métricas e Ferramentas de Análise de Desempenho

Os *Key Performance Indicators* (KPI) traduzem objetivos estratégicos em indicadores operacionais, permitindo a monitorização contínua e a tomada de decisões baseadas em evidência (Alsyouf et al., 2011). A importância da utilização dos KPI encontra-se explicada na Figura 21. Na Indústria 4.0, os KPI assumem um papel estratégico uma vez que permitem converter grandes volumes de dados em informação necessária à tomada de decisão. A integração de tecnologia possibilita a aquisição de dados que, traduzidos em KPI permitem a monitorização em tempo real dos processos produtivos, promovendo respostas e ações corretivas de forma rápida.



Figura 21: Representação da importância dos KPI (M. Silva, 2014).

Os KPI também permitem avaliar a eficácia da produção, o uso racional de recursos e a manutenção preditiva, alinhando-se com os princípios de sustentabilidade e MC. Assim, na Indústria 4.0, os KPI não só permitem medir o desempenho, mas também atuam como elementos críticos para a eficiência operacional e a competitividade das organizações.

A métrica OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) avalia a eficiência global dos equipamentos através da combinação de disponibilidade, performance e qualidade, sendo essencial para decisões de investimento e manutenção (Alsyouf et al., 2011).

O *Takt Time* estabelece o ritmo necessário de produção para satisfazer a procura do cliente, ajudando a equilibrar as células produtivas (Bevan et al., 2005).

O *Kata* de Melhoria propõe a prática deliberada de rotinas estruturadas de melhoria, orientadas por mentores, promovendo o desenvolvimento de competências de pensamento científico e consolidando uma cultura *Lean* nas organizações (Antony et al., 2022).

3.6. Barreiras e Fatores de Sucesso da Melhoria Contínua

A implementação efetiva da MC nas organizações industriais não depende exclusivamente da aplicação técnica de ferramentas ou metodologias. Pelo contrário, o sucesso sustentado destas iniciativas exige a criação de condições organizacionais favoráveis à mudança, bem como o envolvimento de fatores humanos, culturais e estratégicos. Diversos estudos têm identificado as principais barreiras e fatores de sucesso que influenciam a adoção e consolidação das práticas de MC no ambiente empresarial (Antony et al., 2022; Bessant & Caffyn, 1997).

3.6.1. Cultura Organizacional

A cultura organizacional constitui um dos pilares mais influentes no êxito ou fracasso de programas de MC. Organizações com uma cultura hierárquica, avessa ao erro e orientada para o curto prazo tendem a enfrentar dificuldades na implementação sustentada da melhoria. Em contrapartida, culturas baseadas na aprendizagem contínua, na colaboração interdepartamental e no *empowerment* tendem a facilitar a adoção de práticas *Kaizen*, *Lean* ou *Six Sigma* (Bessant & Francis, 1999). A MC exige um ambiente onde os colaboradores sintam liberdade para identificar problemas e propor soluções sem receio de sanções, o que só é possível com uma cultura que valorize a transparência, o envolvimento e a inovação (Carneiro et al., 2025).

3.6.2. Compromisso da Liderança

O envolvimento da liderança é apontado como um fator determinante. A MC não deve ser vista como um projeto isolado, mas sim como parte integrante da estratégia organizacional. Isso requer que os líderes forneçam uma direção clara, recursos adequados, reconhecimento contínuo e, sobretudo, que atuem como modelo de comportamento. A ausência de suporte visível por parte da gestão de topo compromete o alinhamento interno e a motivação das equipes (Antony et al., 2022). Estudos demonstram que a liderança desempenha um papel central, mais do que meramente executivo, ao fomentar uma cultura de MC. Por exemplo, Khattak et al. (2020) mostraram que a liderança transformacional impulsiona os esforços de MC dos colaboradores, sendo esse efeito mediado pela confiança depositada nos líderes.

3.6.3. Resistência à Mudança

A resistência à mudança representa um obstáculo comum em várias iniciativas de transformação organizacional, e a MC não é exceção. Esse tipo de resistência costuma resultar do medo do desconhecido, receio de perda de controle e a tendência de manter o *status quo*. Superar essa barreira requer uma comunicação transparente, capacitação sistemática e a participação ativa dos colaboradores desde as fases iniciais da mudança (Hubbart, 2023). A construção de confiança e o respeito pelos ritmos de adaptação de cada equipe são cruciais para garantir o sucesso das mudanças (Liker, 2004).

3.6.4. Formação e Capacitação

A ausência de competências técnicas e comportamentais adequadas constitui um dos obstáculos mais recorrentes. A MC exige domínio de ferramentas como PDCA, *Kaizen*, mapeamento da cadeia de valor, análise estatística, entre outras; bem como competências interpessoais como trabalho em equipe, pensamento crítico e resolução de problemas. Organizações que investem sistematicamente em capacitação estruturada e aprendizagem prática (como por exemplo, *workshops Kaizen*, formação em *Six Sigma*) tendem a consolidar uma base sólida para a melhoria de desempenho dos colaboradores das empresas (Antony et al., 2022).

3.6.5. Sustentabilidade das Melhorias

Um dos maiores desafios da MC é garantir que os ganhos obtidos sejam mantidos ao longo do tempo. Muitas iniciativas geram resultados positivos iniciais, mas falham na fase de sustentação, voltando aos padrões anteriores. Este fenômeno decorre frequentemente da falta de padronização dos novos processos, da ausência de mecanismos de monitorização, ou da rotatividade de colaboradores sem transferência de conhecimento. O *standard work*, aliado à auditoria de processos e indicadores visuais, é essencial para assegurar a continuidade das melhorias (Oakland, 2014; Bernard et al., 2025).

A Tabela 12 sintetiza as barreiras e os fatores de sucesso identificados no que diz respeito à implementação da MC.

Tabela 12: Barreiras e os fatores de sucesso à implementação da MC.

Dimensão	Barreiras Identificadas	Fatores de Sucesso
Cultura organizacional	Ambiente avesso ao erro Foco no curto prazo Falta de colaboração	Cultura de aprendizagem Incentivo à melhoria Valorização do erro como oportunidade
Compromisso da liderança	Falta de apoio visível da liderança Ausência de alinhamento estratégico	Liderança transformacional Recursos alocados Reconhecimento contínuo
Resistência à mudança	Medo do desconhecido Falta de envolvimento Comunicação deficiente	Gestão da mudança estruturada Envolvimento precoce dos colaboradores
Formação e capacitação	Falta de competências técnicas Ausência de formação prática	Programas de capacitação Workshops <i>Kaizen</i> Formação <i>Six Sigma</i>
Sustentabilidade das melhorias	Não padronização de novos processos Ausência de monitorização contínua	Trabalho padronizado Indicadores visuais Auditorias sistemáticas

4. Análise de Resultados da RSL

O presente capítulo corresponde à análise de conteúdo das duas iterações de pesquisa. Através da leitura e interpretação detalhada dos artigos selecionados, complementada pela análise da matriz de relação desenvolvida no âmbito desta dissertação, procede-se à identificação e discussão das principais ferramentas de MC e de digitalização, bem como à análise crítica das suas interligações e sinergias no contexto industrial atual. O capítulo evidencia não apenas a coexistência destas abordagens, mas também o seu potencial conjunto na criação de sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e sustentáveis, particularmente no atual cenário de transição digital.

4.1. Análise da Integração das Tecnologias Digitais

Foi realizada uma análise dos estudos centrados nas tecnologias de digitais e de digitalização, evidenciando a sua aplicação no contexto da Indústria 4.0. A Figura 22 reflete a frequência com que as diferentes categorias de ferramentas de digitalização são identificadas nos artigos selecionados na presente RSL (consultar Apêndice 3).

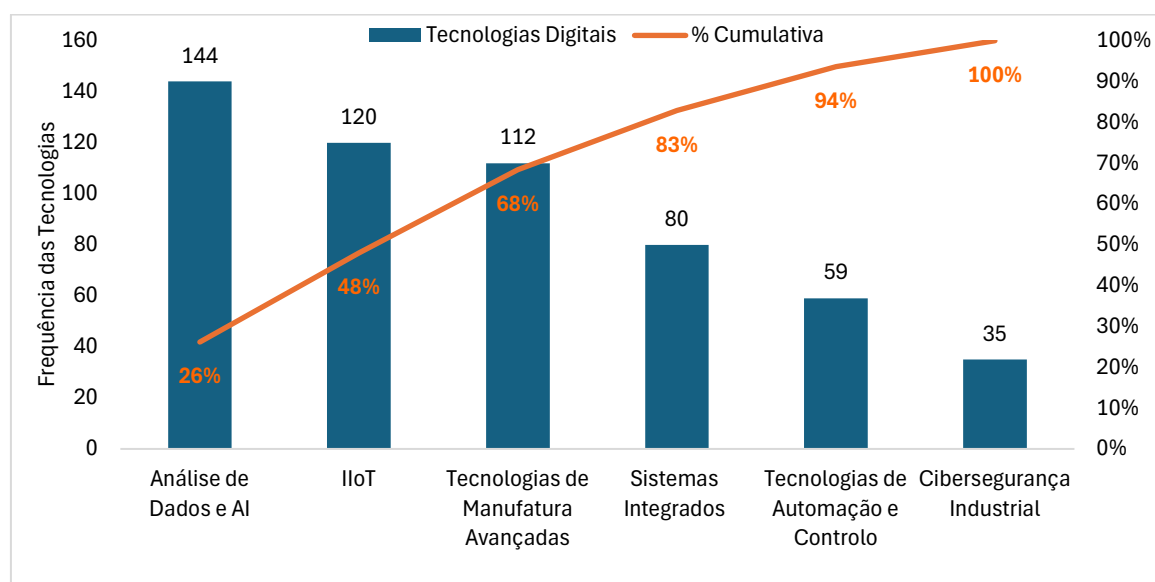


Figura 22: Frequência das tecnologias de digitalização mais mencionadas na literatura.

A análise dos dados evidencia uma clara predominância da categoria “Análise de Dados e AI”, com um total de 144 referências nos artigos consultados. Este resultado confirma o crescente interesse da literatura científica na aplicação nestas tecnologias, as quais têm demonstrado um impacto importante na otimização de processos industriais.

Seguindo esta tendência, a categoria “IIoT” apresenta 120 referências, evidenciando a importância atribuída à conectividade e ao intercâmbio de dados entre dispositivos e sistemas. As tecnologias associadas ao IIoT permitem a recolha de grandes volumes de dados em tempo real, assegurando a monitorização contínua e o controlo descentralizado das operações industriais. Esta ampla adoção reflete o papel central da IIoT na arquitetura da Indústria 4.0, funcionando como um conector entre o mundo físico e os sistemas digitais.

A categoria “Tecnologias de Manufatura Avançadas” regista 112 referências, demonstrando um foco crescente no desenvolvimento e aplicação de tecnologias como manufatura aditiva, robótica colaborativa, RA e veículos autónomos. Estas soluções contribuem significativamente para o aumento da flexibilidade, a personalização dos produtos e a eficiência dos processos produtivos, reforçando a capacidade adaptativa das indústrias face às novas exigências de mercado.

Com 80 referências, a categoria “Sistemas Integrados” destaca-se pela sua relevância na interligação entre diferentes sistemas industriais, assegurando a fluidez dos dados e a interoperabilidade ao longo da cadeia de valor. A capacidade de integrar sistemas de gestão, de produção e de controlo é essencial para o sucesso da transformação digital, permitindo uma gestão integrada e eficiente das operações. Conjuntamente, estes 4 grupos classificativos de tecnologias de digitalização representam 83% das referências efetuadas a tecnologias de digitalização identificadas nos documentos incluídos na RSL.

As “Tecnologias de Automação e Controlo” surgem com 59 referências, mantendo um papel relevante no suporte à automação de processos industriais. Embora sejam tecnologias mais maduras, como SCADA, PLC e DCS, continuam a constituir a base operacional de muitos sistemas industriais, sendo frequentemente integradas com tecnologias emergentes.

Por fim, a “Cibersegurança Industrial” regista 35 referências. Embora com um número inferior face às demais categorias, a sua presença na literatura demonstra uma crescente preocupação com a proteção de sistemas industriais contra ameaças cibernéticas, sendo um tema crítico no contexto de ambientes industriais altamente conectados.

Após esta análise geral, importa aprofundar o conhecimento sobre as tecnologias dentro de cada categoria, com base nos estudos analisados. No domínio das “Tecnologias de Automação e Controlo”, as ferramentas mais utilizadas incluem os sistemas SCADA, PLC, DCS e HMI. Os sistemas SCADA, com oito referências, são amplamente aplicados para supervisão remota e aquisição de dados, conforme evidenciado por Fakir et al. (2023), onde são integrados com PLC e IIoT para monitorização em tempo real de operações fabris.

Os PLC e DCS são utilizados para automatizar processos repetitivos e controlar equipamentos críticos, sendo fundamentais para manter a continuidade operacional, como ilustrado no estudo de Sassanelli et al. (2021). As HMI são frequentemente aplicadas para melhorar a interação homem-máquina, facilitando a operação dos sistemas. A robótica colaborativa, com 28 referências, destaca-se pelo seu uso na automação de tarefas complexas em ambientes industriais, como demonstra Sassanelli et al. (2021), no qual os *cobots* contribuem para a eficiência e segurança das operações.

Na categoria “IIoT”, o destaque vai para os sensores inteligentes, com 37 referências, essenciais para recolha de dados em tempo real. Fakir et al. (2023) exemplifica a sua aplicação na deteção automática de falhas e na manutenção preditiva. Os sistemas que aplicam RFID, com 15 referências, são amplamente usados para rastreabilidade, como demonstrado por Kunju et al. (2022), que descreve a sua implementação para controlo de ativos e fluxos logísticos. As plataformas IIoT e os *gateways* IIoT facilitam a integração entre dispositivos e sistemas na nuvem, enquanto o *edge computing* e a *cloud computing* suportam o processamento local e o armazenamento de dados massivos, respetivamente, com exemplos claros nos artigos de Fakir et al. (2023) e Ferreira et al. (2023).

Relativamente à “Análise de Dados e AI”, o *Big Data Analytics*, com 43 referências, é amplamente utilizado para otimização de processos e predição de falhas, como observa Fasuludeen Kunju et al. (2022), que descreve a sua aplicação na análise energética e na gestão de manutenção. O *Machine Learning* e os *Digital twins* são usados para simulações e otimizações avançadas. De acordo com Sassanelli et al. (2021) os modelos de *digital twins* são aplicados para simulação de linhas de montagem, permitindo ganhos substanciais em eficiência. A visão computacional e os algoritmos de otimização reforçam a automação de inspeções de qualidade e a programação de produção.

Os “Sistemas Integrados” são assegurados por soluções como MES e ERP, respetivamente com 28 e 31 referências. Estas ferramentas são fundamentais para garantir a integração entre os níveis operacionais e de gestão, como ilustrado no artigo de Fakir et al. (2023), que detalha a implementação conjunta de MES e ERP para uma gestão integrada e otimizada. Por sua vez, sistemas PLM, API industriais contribuem para a interoperabilidade entre diferentes plataformas tecnológicas.

No campo da “Cibersegurança Industrial”, as *firewalls* industriais e sistemas de monitorização são as tecnologias mais referenciadas, sendo aplicadas na proteção contra ciberataques, como evidenciado pelos artigos Fakir et al. (2023) e Ferreira et al. (2023).

Soluções de autenticação, gestão de vulnerabilidades e *backup* são essenciais para garantir a integridade, confidencialidade e disponibilidade dos dados industriais.

Por fim, na categoria das “Tecnologias de Manufatura Avançada”, destacam-se a manufatura aditiva (impressão 3D), a RA, a RV e os AGV/*drones*. De acordo com Sassanelli et al. (2021), a impressão 3D é utilizada para produção rápida de peças, enquanto *cobots* e veículos autônomos são aplicados para transporte de materiais. A RA e virtual são frequentemente usadas para formação e simulações, como referenciado por Ferreira et al. (2023), que também aborda o uso de *blockchain* para rastreabilidade em cadeias de abastecimento.

Esta análise evidencia não só a frequência de utilização destas ferramentas, mas também as suas aplicações concretas nos diferentes estudos, revelando que, na literatura analisada, as tecnologias digitais são aplicadas de forma altamente estratégica, com ênfase na conectividade, na análise de dados e na otimização dos processos industriais.

4.2. Análise da Integração das Ferramentas de Melhoria Contínua

A Figura 23 representa a frequência de utilização das ferramentas de MC identificadas nos artigos analisados na RSL desenvolvida (consultar Apêndice 4). Esta análise revela as ferramentas mais frequentemente referenciadas, proporcionando uma visão clara das preferências atuais na literatura científica e das tendências emergentes no domínio da MC em contexto industrial.

Considerando o elevado número de ferramentas citadas nos documentos consultados, e de forma a clarificar melhor a análise, estas foram agrupadas em quatro principais classes: “Ferramentas de Padronização de Operações”, “Ferramentas de Diagnóstico de Problemas e Qualidade”, “Ferramentas de Análise de Fluxo de Processo”, e “Métricas e Ferramentas de Desempenho”.

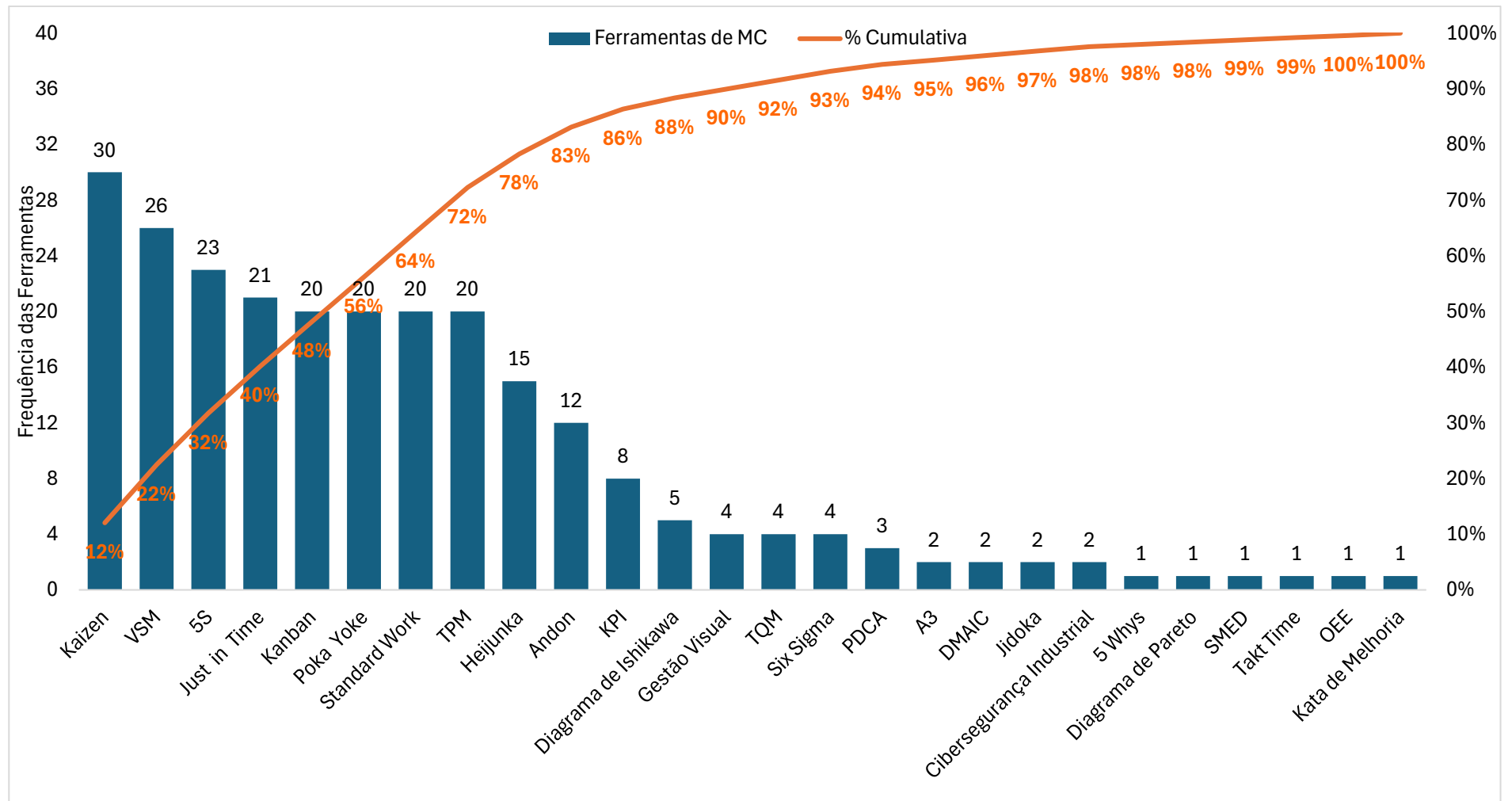


Figura 23: Representação da utilização das Ferramentas de MC.

As ferramentas classificadas como “**Ferramentas de Padronização de Operações**” evidenciam-se de forma marcante nesta amostra de documentos, com destaque claro para o *Kaizen*, que registra 30 referências, consolidando-se como a metodologia mais recorrente entre os estudos analisados. Este resultado confirma o papel central do *Kaizen* na promoção da melhoria incremental, sendo amplamente aplicado em diferentes contextos industriais. Segue-se a ferramenta 5S, com 23 referências, evidenciando-se como um pilar essencial para a organização dos postos de trabalho e para a eliminação sistemática de desperdícios, características que explicam a sua ampla aplicação prática. Outras ferramentas básicas amplamente referenciadas incluem o *Standard Work*, com 20 referências, ambas com grande relevância no contexto da gestão e otimização de processos. Estas metodologias destacam-se pela sua capacidade de mapear fluxos de valor e estabelecer padrões operacionais, respetivamente, sendo cruciais para a eficiência produtiva e a normalização de práticas industriais. Ferramentas como o JIT e o *Kanban*, com 21 e 20 menções, respetivamente, reforçam a preponderância das metodologias *Lean* na literatura recente, sublinhando o foco contínuo da indústria na gestão visual de fluxos e na produção puxada, com vista à eliminação de desperdícios e à sincronização eficiente das operações. A Gestão Visual, embora com 4 referências, continua a ser reconhecida como uma ferramenta relevante no suporte à transparência operacional e à comunicação visual nas organizações industriais e intrinsecamente relacionada com o *Standard Work*. O ciclo PDCA é referido apenas 3 vezes.

Uma das ferramentas classificadas como “**Ferramentas de Diagnóstico de Problemas e Qualidade**” mais mencionada é o *Poka Yoke*, com 20 referências. O *Poka Yoke* mantém-se como um instrumento importante para a prevenção de erros, garantindo a qualidade dos processos produtivos. O *Andon*, com 12 referências, destaca-se como uma ferramenta importante para a sinalização visual e a gestão de incidentes em tempo real.

O Diagrama de *Ishikawa*, com 5 referências, é uma ferramenta tradicionalmente eficaz na identificação de causas-raiz de problemas complexos. Ferramentas como o Diagrama de Pareto e o 5 *Whys* (com 1 referência cada), surgem com menor destaque, embora continuem a ter aplicação na resolução de problemas específicos e na priorização de causas. O A3 e o DMAIC, ambos com 2 referências, demonstram uma utilização moderada, evidenciando o seu valor em contextos que exigem uma análise estruturada de problemas e a implementação de melhorias sistemáticas.

O TQM e o *Six Sigma* surgem com 4 referências cada, refletindo a sua aplicação continuada em projetos de gestão da qualidade, apesar da menor frequência face às ferramentas *Lean*. O CEP, com 2 referências, tem uma elevada relevância na monitorização estatística da qualidade e na medição do desempenho global dos processos. O *Jidoka*, com 2 referências, apesar de ter uma aplicação mais circunscrita, é muito importante no controlo automático da qualidade.

No que diz respeito às ferramentas **“Ferramentas de Análise de Fluxo de Processo”**, o TPM surge com 20 referências, confirmando a sua relevância enquanto abordagem essencial para a gestão da manutenção e para a maximização da eficiência global dos equipamentos. Outras ferramentas como o VSM e o SMED, com 26 referências com 1 referência, respetivamente, continuam a ser reconhecidas pelo seu importante papel na melhoria de fluxos de produção, na redução de tempos de *setup* e, conseqüentemente, no *lead time* produtivo. O *Heijunka*, com 15 referências, demonstra ainda uma aplicação consistente no âmbito das práticas diárias das empresas, representando abordagem estruturada para o nivelamento da produção.

Em relação às **“Métricas e Ferramentas de Desempenho”**, a utilização genérica de KPI, com 8 referências, destaca-se nesta categoria, evidenciando a importância crescente da monitorização de indicadores-chave como suporte à tomada de decisão baseada em dados. O OEE, com 1 referência, continua a ser uma métrica fundamental na era da Indústria 4.0, mas com um papel mais dinâmico, digital e estratégico. Por fim, o *Kata* de Melhoria, com 1 referência, evidencia uma utilização pontual, embora represente uma abordagem emergente de desenvolvimento de rotinas de MC nas organizações.

Numa perspetiva global, a análise permite concluir que as ferramentas de MC mais referenciadas na literatura científica mantêm um forte alinhamento com as práticas *Lean*, com especial destaque para o *Kaizen*, o VSM, o 5S, o JIT, o *Kanban*, o *Poka Yoke*, o *Standard Work*, o TPM e o *Heijunka*, representam conjuntamente 78% das referências efetuadas a ferramentas de MC identificadas nos documentos incluídos na RSL. Estas ferramentas, caracterizadas pela simplicidade, elevada aplicabilidade e forte impacto nos processos operacionais, continuam a dominar a preferência das organizações e dos investigadores, consolidando-se como pilares centrais nas iniciativas de MC.

Por outro lado, ferramentas focadas na análise e na resolução de problemas (*root cause analysis*), como o Diagrama de *Ishikawa*, Diagrama de Pareto, 5 *Whys* e A3, demonstram o seu valor em contextos que exigem rigor analítico e controlo sistemático das operações.

As ferramentas de análise de fluxo de processo, como o VSM e o TPM, reforçam a sua importância nas estratégias de manutenção, essenciais para garantir a estabilidade operacional e a agilidade dos processos industriais.

Importa ainda destacar que esta distribuição de frequências reflete a coexistência de abordagens clássicas e emergentes na literatura atual. As metodologias *Lean* permanecem relevantes, sendo frequentemente combinadas com ferramentas analíticas e digitais para potenciar a eficiência operacional e a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Esta tendência está em consonância com as evidências obtidas nos artigos analisados ao longo desta RSL, nos quais a integração entre práticas de MC e tecnologias digitais têm assumido um papel central nas estratégias industriais contemporâneas.

Deste modo, esta análise corrobora a ideia de que a combinação de ferramentas *Lean* com abordagens estruturadas de resolução de problemas e sistemas de controlo da qualidade constitui uma base robusta para as organizações que pretendem alcançar elevados níveis de desempenho e adaptabilidade no atual contexto de transformação digital.

4.3. Discussão Crítica

Nesta secção apresenta-se a discussão crítica sobre transição digital e uso de ferramentas de MC na indústria, com base na análise da RSL. Esta discussão foi dividida em quatro principais aspetos: produtividade, qualidade, sustentabilidade e sob o ponto de vista do fator humano.

4.3.1. Análise do Impacto na Produtividade e na Eficiência Operacional

A eficiência operacional, muitas vezes quantificada através de medidas de produtividade, constitui o eixo central da digitalização industrial, ou seja, o principal motor que impulsiona a adoção das tecnologias emergentes associadas à Indústria 4.0. Na maioria dos casos, as empresas iniciam a sua jornada digital, motivadas pela necessidade de redução de desperdícios, da melhor gestão de recursos e da maximização da produtividade. Esta lógica está documentada na literatura recente, a qual confirma que a digitalização não só melhora processos, como reposiciona as organizações perante desafios e oportunidades estratégicas. Neste contexto, a eficiência operacional não deve ser entendida de forma isolada, pois estabelece a base para outros benefícios da digitalização industrial, nomeadamente nas áreas da qualidade, sustentabilidade e do fator humano, que também são analisadas neste documento.

Os estudos analisados apresentam evidências claras de que a digitalização é um instrumento fundamental para a reconfiguração dos processos produtivos e logísticos. O uso de tecnologias digitais possibilita um controlo mais rigoroso e detalhado das operações, promovendo uma produção mais ágil, flexível e resiliente. Bandara & Buics (2024) ilustra este ponto ao demonstrar como os *digital twins* permitem a simulação e a otimização de operações complexas, assegurando uma gestão preditiva e adaptativa das cadeias de abastecimento. Estes sistemas virtuais permitem antecipar cenários operacionais, identificar pontos de estrangulamento e ajustar decisões em tempo real, o que resulta num impacto direto sobre a eficiência global das operações.

Weerabahu et al. (2021) reforça que a adoção de tecnologias como sensores inteligentes, CPS e plataformas de análise avançada de dados resulta na melhoria da coordenação entre as diferentes fases da cadeia de valor, reduzindo *stocks*, minimizando desperdícios e aumentando a capacidade de resposta face às oscilações da procura.

A automatização é igualmente um vetor central na promoção da eficiência operacional, especialmente quando integrada com ferramentas *Lean* como o *Jidoka*, *Poka Yoke*, *Andon*, *Kanban* eletrónico. Tortorella et al. (2021) apresenta um modelo em que a automação inteligente, aliada aos princípios *Lean*, resulta na eliminação sistemática de atividades sem valor acrescentado e na redução do *lead time* produtivo. Este conceito, conhecido como *Lean Automation*, utiliza sensores, sistemas de monitorização em tempo real e robótica colaborativa para adaptar continuamente as operações, reduzir tempos de ciclo e evitar interrupções não planeadas. Na mesma linha, Naciri et al. (2022) demonstra como as tecnologias digitais facilitam a produção sob encomenda e a personalização em massa, mantendo elevados níveis de eficiência operacional, um feito difícil de alcançar com abordagens tradicionais.

A eficiência operacional vai para além da produção, sendo igualmente evidente nas áreas de fiabilidade, manutenção e logística. No estudo de Dutta et al. (2021), demonstra-se como a aplicação de ferramentas digitais nos processos de inspeção, incluindo algoritmos de *machine learning* e visão computacional, reduz drasticamente o tempo necessário para controlar a qualidade e aumenta a fiabilidade das inspeções, evitando retrabalho e desperdícios. De igual forma, Frecassetti et al. (2024) mostra que o planeamento digitalizado da produção, suportado por análise preditiva e *big data*, resulta em melhores previsões da procura e numa gestão mais eficaz dos recursos produtivos, com impactos diretos na eficiência global.

Outro aspeto frequentemente abordado na literatura é a melhoria da gestão das cadeias de abastecimento. No estudo de Vinodh et al. (2021) é evidenciado que a integração digital permite alcançar um nível elevado de visibilidade e rastreabilidade ao longo de toda a cadeia de valor, facilitando a gestão de riscos e aumentando a agilidade operacional. A utilização de tecnologias como RFID, sensores conectados e plataformas em nuvem permite monitorizar em tempo real os fluxos de materiais e responder rapidamente a eventos imprevistos.

A digitalização também revoluciona a forma como as operações são monitorizadas e ajustadas no dia-a-dia. Clausen et al. (2020) demonstram como a adoção de quadros digitais de gestão no chão-de-fábrica melhora significativamente a eficiência operacional, através da monitorização contínua dos indicadores de desempenho e da identificação rápida de desvios, permitindo intervenções imediatas. Esta abordagem não só substitui práticas analógicas como também reforça a cultura de MC, centrada na rapidez e na eficácia.

Em paralelo, Antony et al. (2021) introduz um conceito emergente, o *Six Sigma 4.0*, que associa a robustez das metodologias de MC ao poder das tecnologias digitais. Este modelo impulsiona ganhos operacionais sustentados, possibilitando a redução do tempo de ciclo, a otimização da eficiência energética e a melhoria da estabilidade dos processos, tudo suportado por sistemas de apoio à decisão baseados em dados.

As PME beneficiam da digitalização. Mofolasayo et al. (2022) evidencia que, mesmo em contextos com recursos limitados, a combinação entre tecnologias digitais acessíveis e práticas *Lean* permite melhorar os fluxos de valor e alcançar ganhos operacionais substanciais, muitas vezes com investimentos iniciais moderados e escaláveis.

Solheim & Powell (2020) destaca que a eficiência operacional não deve ser encarada como um resultado isolado, mas sim como um dos principais catalisadores da transformação digital. O *roadmap* apresentado demonstra que a aplicação progressiva de tecnologias digitais, incluindo AI, sistemas de RA e cibersegurança, permite melhorar a sincronização entre processos, reduzir desperdícios e reforçar a fiabilidade dos sistemas produtivos, criando as condições ideais para uma eficiência operacional sustentável.

Assim, a literatura analisada converge num ponto central: a produtividade e a eficiência operacional constituem o principal benefício imediato e tangível da digitalização industrial. Através da integração entre tecnologias digitais e metodologias de MC, as empresas conseguem alcançar uma otimização dos seus processos produtivos e logísticos.

Este impacto, além de gerar benefícios económicos diretos, estabelece as fundações para outros efeitos igualmente relevantes, nomeadamente nos domínios da qualidade, da sustentabilidade e do fator humano.

4.3.2. Impacto na Qualidade

A transição digital na indústria tem provocado profundas mudanças nos sistemas de gestão da qualidade, desafiando as abordagens tradicionais e promovendo a incorporação de tecnologias avançadas. A partir da análise dos artigos selecionados na presente RSL, observa-se que a digitalização tem um impacto expressivo na qualidade industrial, entendida não apenas como a conformidade de produtos e processos, mas também como o controlo de processo, a rastreabilidade e a capacidade preditiva dos sistemas industriais.

Os avanços tecnológicos associados à Indústria 4.0 têm promovido uma reconfiguração dos sistemas de gestão da qualidade. A integração de tecnologias digitais resulta em melhorias significativas na monitorização, no controlo e na previsão da qualidade dos processos e produtos industriais. Spaltini et al. (2024), por exemplo, evidencia a utilização de tecnologia de verificação dimensional através de sistemas *laser*, ferramentas inteligentes conectadas e sistemas de RA para validar automaticamente tarefas e reduzir não conformidades. Esta abordagem contribui não apenas para a eliminação de erros humanos, como também para o aumento da eficiência e da rastreabilidade dos processos de produção. Do mesmo modo, Carvalho et al. (2024) demonstra a evolução dos sistemas de qualidade tradicionais para a abordagem denominada *Quality 4.0*, na qual o controlo passa de amostragens periódicas para um controlo contínuo, com base em tecnologias como a AI e os sistemas ciberfísicos. Esta transição permite uma maior fiabilidade e eficácia no controlo da qualidade, além de promover a redução de falhas e retrabalho, aumentando simultaneamente a produtividade e a inovação organizacional.

Zhang et al. (2024), centrado na *Construction 4.0*, salienta que a integração de tecnologias como o *Building Information Modeling* (BIM), a IoT e a RA possibilitam melhorias na precisão e eficiência dos processos construtivos. Os impactos positivos incluem a redução de erros, a melhoria dos métodos de estimativa e o cumprimento das *milestones* dos projetos dentro dos prazos estipulados, traduzindo-se em ganhos diretos na qualidade dos ativos construídos. São diversas as abordagens de digitalização no setor da construção civil: modelação BIM com integração de dados de custos, prazos, materiais; sistemas IoT para monitorização de vibração, temperatura ou deslocamento de estruturas.

No contexto das PME, Ammirato et al. (2023) e Sassanelli et al. (2021) reforçam o papel sinérgico entre as práticas *Lean* e as tecnologias digitais. Estas investigações demonstram que a adoção combinada de ferramentas como o VSM, o 5S, o *Kanban* e tecnologias como IoT, *Big Data* e AI permite um controlo mais eficaz dos processos produtivos. Destacam-se melhorias na deteção precoce de defeitos, na padronização de processos e na capacidade de resposta a desvios, fatores determinantes para o aumento da qualidade e da consistência dos produtos.

Kunju et al. (2022) revela como a integração de manutenção preditiva, sensores inteligentes e análise de dados em tempo real impacta a qualidade nas operações de produção e manutenção. Os resultados apontam para a redução de tempos de inatividade, o aumento da produtividade e a melhoria no controlo de qualidade, com efeitos diretos na segurança e na satisfação dos clientes.

De igual modo, o estudo apresentado no artigo Tobon-Valencia et al. (2022) evidencia melhorias significativas na qualidade através da digitalização dos processos de planeamento da produção. A utilização de ferramentas de simulação, combinadas com CPS e AI, resulta em planos de produção mais robustos, ágeis e precisos. Este avanço tecnológico proporciona uma maior capacidade de adaptação a perturbações e uma redução dos erros de planeamento.

Kihel (2022) explora as sinergias entre a produção *Lean* e a Indústria 4.0, realçando o impacto destas abordagens na qualidade. A integração de tecnologias digitais com práticas *Lean* tem permitido a monitorização da qualidade em tempo real, a rastreabilidade total e a deteção proativa de defeitos. Este modelo híbrido fortalece a consistência dos processos e a robustez dos produtos, consolidando a importância da digitalização na gestão da qualidade. Outros estudos, como Tinz et al. (2019) e X. Chen et al. (2023), embora não focados exclusivamente na qualidade, evidenciam impactos indiretos relevantes. A gestão do conhecimento e a implementação de fábricas inteligentes promovem a criação de ambientes produtivos mais robustos, capazes de melhorar a eficiência, reduzir erros e potenciar a inovação. Estas contribuições são fundamentais para assegurar elevados padrões de qualidade num contexto industrial cada vez mais digitalizado.

Apesar dos benefícios evidenciados, alguns artigos também indicam desafios na implementação de tecnologias digitais para a gestão da qualidade. Por exemplo, Bellantuono et al. (2021) alerta para a necessidade de uma abordagem integrada de gestão da mudança, de forma a garantir a aceitação das tecnologias digitais pelos colaboradores.

Adicionalmente, a formação contínua e o desenvolvimento de novas competências são identificados como fatores críticos para o sucesso da digitalização na qualidade, conforme sublinhado nos artigos por Ammirato et al. (2023) e Kunju et al. (2022).

Desta forma, torna-se evidente que a digitalização tem um impacto significativo e transversal na qualidade industrial. A introdução de tecnologias como a IoT, *big data*, AI, *digital twins* e RA tem permitido um controlo mais rigoroso e automatizado dos processos produtivos, promovendo a rastreabilidade, a redução de não conformidades e a MC. As abordagens híbridas, que combinam práticas *Lean* com tecnologias digitais, emergem como soluções altamente eficazes, especialmente no contexto das PME, contribuindo para uma melhoria sustentada da qualidade. Não obstante, o sucesso destas iniciativas depende fortemente da capacidade das organizações em promover a adaptação cultural e a capacitação dos trabalhadores, assegurando uma transição digital inclusiva e centrada no ser humano.

Conclui-se, assim, que a gestão da qualidade no contexto da Indústria 4.0 não deve ser encarada apenas como uma questão tecnológica, mas como um processo sociotécnico que integra fatores humanos, organizacionais e tecnológicos, orientado para a excelência operacional e para a criação de valor sustentável.

4.3.3. Impacto na Sustentabilidade

A sustentabilidade tem emergido como um dos pilares centrais no contexto da digitalização industrial, à medida que as organizações procuram integrar tecnologias digitais nas suas operações. Os artigos analisados na RSL evidenciam que a transição digital pode promover impactos significativos nas três dimensões da sustentabilidade: ambiental, social e económica; ainda que a intensidade e abrangência destes impactos variem consoante os setores industriais e as tecnologias aplicadas.

Vukelić et al. (2024) destaca a Indústria 4.0 enquanto um modelo que visa não apenas a eficiência produtiva, mas também a sustentabilidade e a resiliência das organizações. A investigação realça a importância da convergência entre o ciberespaço e o espaço físico, promovendo o equilíbrio entre avanços tecnológicos e o bem-estar social. Este estudo salienta que a integração de tecnologias emergentes e maduras contribui para o desenvolvimento económico sustentável e para a criação de indústrias resilientes, ao mesmo tempo que valoriza o potencial humano e a eliminação de tarefas redundantes.

No setor da energia renovável, Arcelay et al. (2021) enfatiza o papel crucial das energias limpas na transição para uma economia neutra em carbono. O estudo demonstra que as tecnologias digitais, como a IoT, a AI e os *digital twins*, têm um impacto determinante na descarbonização, permitindo uma utilização mais eficiente dos recursos energéticos e aumentando a fiabilidade da geração e distribuição de energia. Os autores sublinham que a Indústria 4.0 não apenas impulsiona a eficiência energética e a redução de emissões de carbono, como também apoia a economia circular, destacando práticas como a reutilização de recursos, a reciclagem e a gestão sustentável dos resíduos.

Casciani & D'Itria (2024), focado na indústria têxtil e do vestuário, aprofunda a relação entre digitalização e sustentabilidade através da economia circular. Tecnologias como *big data*, *blockchain*, manufatura aditiva, RA e AI possibilitam rastreabilidade e transparência em toda a cadeia de valor, promovendo práticas sustentáveis, como a reciclagem de tecidos, o design ecológico e a gestão de resíduos industriais. O estudo sugere que o *design* desempenha um papel central na sustentabilidade do setor, sendo responsável por cerca de 80% dos impactos ambientais de um produto, e defende a necessidade de reconfigurar as práticas industriais para alcançar uma economia circular plena.

Por seu turno, Zhang et al. (2024) exploram o conceito de *Construction 4.0*, enfatizando o contributo desta abordagem para a sustentabilidade económica, social e ambiental na indústria da construção. Os autores referem que a adoção de tecnologias digitais, como BIM, *drones*, IoT e AI, permite uma redução substancial do consumo de recursos e energia, a diminuição da geração de resíduos e a redução das emissões de dióxido de carbono. A utilização de materiais recicláveis e a conceção de edifícios adaptados à reutilização contribuem para a construção de cidades e comunidades mais sustentáveis.

Moosbrugger et al. (2022) aprofundam o papel das tecnologias digitais na promoção de uma abordagem empresarial mais sustentável. Nesta análise, destaca-se a promoção da economia circular, a redução de resíduos e a melhoria da eficiência e eficácia no uso dos recursos. Os autores referem que a implementação de tecnologias como AI, CPS e IoT fomenta práticas industriais mais ecológicas, incluindo a utilização de energia limpa e o aproveitamento de recursos naturais para a criação de produtos de valor acrescentado.

Ferreira et al. (2023) apresentam uma análise dos impactos ambientais e sociais da digitalização em empresas manufatura. Tecnologias como AI, *blockchain*, robótica e *big data* contribuem para a redução do consumo de energia e de recursos naturais, a reciclagem e reutilização de materiais e a redução das emissões de carbono.

No contexto das PME, Ammirato et al., (2023) e Sassanelli et al., (2021) demonstram que a integração entre práticas *Lean* e tecnologias digitais não apenas melhora a eficiência operacional, mas também potencia ganhos em sustentabilidade. Estas investigações revelam que a combinação de metodologias *Lean* com tecnologias como IoT, *big data* e AI permite a redução de desperdícios materiais e energéticos, a monitorização ambiental em tempo real e a adoção de práticas de produção mais ecológicas e eficientes. Os autores sublinham que estas sinergias são particularmente relevantes para as PME, que frequentemente enfrentam limitações de recursos para investir em sustentabilidade.

O estudo de Kunju et al. (2022), centrado nas operações de produção e manutenção, apresenta evidências de que a aplicação de tecnologias digitais promove a eficiência energética, a minimização de resíduos e a redução dos custos operacionais. As tecnologias analisadas, que incluem IoT, RA, AI e robótica colaborativa, permitem a implementação de práticas industriais mais sustentáveis, contribuindo simultaneamente para a redução do impacto ambiental e para o aumento da competitividade empresarial.

Tobon-Valencia et al. (2022) e Centobelli et al. (2025), ainda que com foco primário na eficiência operacional e na gestão do conhecimento, abordam também o papel das tecnologias digitais na promoção da sustentabilidade. Os autores referem que a digitalização dos processos industriais permite ganhos indiretos de sustentabilidade, como a redução do desperdício, a otimização do consumo de energia e a melhoria na utilização de recursos humanos e tecnológicos.

Embora os benefícios ambientais e sociais da digitalização sejam reconhecidos, alguns artigos alertam para desafios associados à sustentabilidade digital. Por exemplo, Adnan et al. (2023) menciona que a implementação de tecnologias digitais pode, em determinados casos, aumentar o consumo energético e as emissões de carbono, caso não sejam adotadas medidas de mitigação apropriadas. Neste sentido, reforça-se a importância de um planeamento estratégico que incorpore objetivos de sustentabilidade desde as fases iniciais da transformação digital.

Desta análise conclui-se que a digitalização, quando estrategicamente orientada, constitui um motor relevante para a sustentabilidade industrial. As tecnologias digitais permitem não apenas uma maior eficiência nos processos produtivos, mas também a minimização de impactos ambientais e a promoção de condições de trabalho mais equitativas e seguras. No entanto, para que estes benefícios sejam concretizados de forma duradoura, é essencial que as organizações adotem uma visão integrada, alinhada com os princípios da economia circular, da eficiência energética e da responsabilidade social.

Em suma, a sustentabilidade no contexto da transição digital industrial não deve ser considerada um efeito colateral ou um mero benefício adicional, mas sim um objetivo estratégico central. As evidências empíricas demonstram que a integração entre tecnologias digitais e práticas sustentáveis é não só possível, como desejável e economicamente viável, sendo fundamental para a construção de uma indústria resiliente, inclusiva e preparada para os desafios globais contemporâneos.

4.3.4. Impacto no Fator Humano

O fator humano tem-se revelado um elemento central na integração entre a Indústria 4.0 e as metodologias de MC, como o *Lean Manufacturing* e o *Six Sigma*. Esta integração não se limita à implementação tecnológica; ela exige uma transformação profunda ao nível das competências, da cultura organizacional e da ergonomia nos ambientes industriais. A literatura recente demonstra que a transição digital nas indústrias, para além dos avanços tecnológicos, depende fortemente da preparação e adaptação dos trabalhadores (Bandara & Buics, 2024; M. Silva et al., 2025).

Um dos temas mais recorrentes nos estudos analisados é a necessidade de desenvolvimento contínuo de competências digitais. A digitalização dos processos produtivos obriga os trabalhadores a adquirir novos conhecimentos, nomeadamente em áreas como análise de dados, IoT e AI (Dinis-Carvalho et al., 2023; Frecassetti et al., 2024). Este fenómeno de *upskilling* e *reskilling* é particularmente premente em PME, onde os recursos e capacidades de formação são mais limitados (Mofolasayo et al., 2022).

Em simultâneo, os estudos reforçam a importância de formações multidisciplinares, que integrem conhecimentos técnicos, digitais e de gestão (Sordan et al., 2022). Torna-se evidente que a aprendizagem contínua deve ser promovida como um princípio estruturante nas organizações, através de programas de treino, simulações práticas e ambientes experimentais (Kırmızı & Kocaoglu, 2022; Solheim & Powell, 2020).

A transformação digital requer, inevitavelmente, uma mudança cultural nas organizações. Os estudos analisados enfatizam o papel ativo da liderança como sua facilitadora (Antony et al., 2021; Naciri et al., 2022). Os gestores são chamados a desempenhar um papel estratégico na promoção da cultura de inovação e de experimentação, incentivando a aceitação do erro como parte integrante do desenvolvimento tecnológico.

Neste contexto, a comunicação transparente assume um papel preponderante, permitindo o alinhamento entre objetivos estratégicos e ações operacionais (Tortorella et al., 2021; Vinodh et al., 2021). A gestão da mudança surge como um elemento fundamental para mitigar resistências internas e garantir o envolvimento ativo das equipes (Weerabahu et al., 2021).

Outro aspecto frequentemente abordado é a ergonomia cognitiva e o bem-estar digital. A introdução de ferramentas digitais nos processos de fabricação tem como um dos principais objetivos reduzir a complexidade das tarefas e facilitar a tomada de decisão (Clausen et al., 2020). Sistemas como *dashboards* e plataformas de visualização são apontados como essenciais para minimizar a sobrecarga cognitiva dos trabalhadores.

Ao mesmo tempo, é reforçada a importância de manter um equilíbrio saudável entre a automação e a intervenção humana, garantindo que os trabalhadores mantêm um papel ativo e relevante no processo produtivo (Naciri et al., 2022; Tortorella et al., 2021). Vários autores sugerem que a digitalização deve ocorrer de forma gradual, para evitar a sobrecarga tecnológica (Dutta et al., 2021). As soluções digitais devem, assim, ser desenhadas com foco na usabilidade, garantindo que os sistemas se adaptam às necessidades dos trabalhadores (Kırmızı & Kocaoglu, 2022). A adaptação física dos ambientes de trabalho é igualmente referida como uma via para promover a segurança e a eficiência (Solheim & Powell, 2020).

A colaboração e o trabalho em equipe emergem como pilares fundamentais na transição digital. A constituição de equipes multifuncionais é um fator determinante para o sucesso da integração entre *Lean* e Indústria 4.0 (Weerabahu et al., 2021). Embora poucos estudos mencionem explicitamente comunidades formais de prática, a colaboração entre humanos e sistemas digitais é discutida, com destaque para a utilização de *digital twins* e RA (Bandara & Buics, 2024; Solheim & Powell, 2020). A gestão eficaz do conhecimento e a colaboração remota, suportadas por sistemas digitais, são vistas como fatores-chave para acelerar a transformação e disseminar boas práticas (Clausen et al., 2020).

O envolvimento e a motivação dos trabalhadores são reforçados através da associação entre as iniciativas digitais e os objetivos organizacionais (Antony et al., 2021). Os estudos referem que a digitalização, quando alinhada com a estratégia da empresa, confere um propósito claro ao trabalho, estimulando o envolvimento das equipes (Frecassetti et al., 2024).

A autonomia operacional é promovida, mas sempre acompanhada de responsabilidade e monitorização baseada em dados digitais (Mofolasayo et al., 2022). O *feedback* contínuo, proporcionado por tecnologias digitais, reforça o ciclo de melhoria e aprendizagem (Tortorella et al., 2021). Contudo, poucos estudos abordam mecanismos formais de reconhecimento ou recompensa, o que revela uma lacuna importante.

No que respeita à inclusão e diversidade, os estudos analisados evidenciam que as tecnologias digitais podem ser adaptáveis a diferentes níveis de maturidade tecnológica, promovendo acessibilidade (Weerabahu et al., 2021). No entanto, a maioria das investigações ainda não aborda explicitamente políticas inclusivas ou a integração geracional. A diversidade de pensamento é, porém, valorizada através da colaboração interfuncional e da integração de múltiplas perspetivas (Dutta et al., 2021). A redução do *gap* digital é vista como um objetivo estratégico de democratização tecnológica.

Por fim, as questões éticas e de responsabilidade têm vindo a ganhar relevância na investigação. A transparência algorítmica é considerada essencial para assegurar a confiança nos sistemas automatizados e nas decisões baseadas em dados (Vinodh et al., 2021). A privacidade e a segurança dos dados emergem como temas críticos, em particular no uso de sistemas *cloud* e IIoT (Solheim & Powell, 2020). Os estudos defendem a partilha de responsabilidade entre humanos e sistemas digitais e salientam a necessidade de equilibrar a vigilância digital com a autonomia operacional (Tortorella et al., 2021; Naciri et al., 2022). O impacto social positivo da digitalização é frequentemente referido, com destaque para o aumento da eficiência, da sustentabilidade e da qualidade dos processos organizacionais (Weerabahu et al., 2021).

4.4. Análise da Relação das Tecnologias Digitais e Melhoria Contínua

A transformação digital na indústria tem proporcionado uma reformulação profunda dos sistemas de produção, promovendo a convergência entre metodologias tradicionais de MC e tecnologias digitais avançadas. Esta secção analisa, de forma mais aprofundada, a integração entre as ferramentas de MC e as tecnologias digitais aplicadas no contexto da transformação das organizações no contexto da Indústria 4.0, utilizando como base uma matriz de relação (Tabela 13), obtida através da análise dos artigos científicos selecionados nesta RSL. A análise dos casos práticos reportados na literatura permitiu identificar fortes sinergias entre as ferramentas de MC e as tecnologias digitais, sendo possível estabelecer relações específicas entre elas.

Tabela 13: Matriz de relação das ferramentas MC e das tecnologias digitais.

MC	Tecnologias Digitais	Descrição de Exemplos de Aplicação
5S	IoT AR/VR MES <i>Dashboards</i>	Monitorização de postos de trabalho com sensores; Alertas automáticos de desorganização; RA para instruções e auditorias digitais.
Kaizen	<i>Digital Twins</i> <i>Machine Learning</i> AR/VR <i>Big Data</i>	Simulação de melhorias via gémeos digitais antes da implementação física; Suporte analítico com AI e <i>dashboards</i> para ciclos <i>Kaizen</i> rápidos e baseados em dados.
VSM	IIoT <i>Big Data</i> <i>Cloud Computing</i> MES <i>Machine Learning</i>	Mapeamento digital de fluxos em tempo real Análise de gargalos e desperdícios com dados de sensores e algoritmos de otimização.
JIT	MES ERP <i>Big Data</i> <i>Machine Learning</i> IIoT	Sincronização automática da produção com a procura; Ajustes em tempo real com base em previsões de AI; Controlo digitalizado de <i>stocks</i> .
Kanban	ERP MES IIoT <i>Cloud Computing</i> <i>Dashboards</i>	Implementação de <i>Kanban</i> digital; Gestão visual automatizada; Controlo remoto dos fluxos de materiais.
TPM	IIoT <i>Machine Learning</i> MES <i>Digital Twins</i>	Monitorização preditiva da condição de máquinas com sensores; Programação automática de manutenção; Uso de <i>digital twins</i> para otimização de intervenções.
Poka-Yoke	Visão Computacional IIoT Sensores Inteligentes <i>Cobots</i>	Integração com sistemas de visão e sensores para prevenção automática de erros; Automação de inspeções.
Standard Work	MES AR/VR <i>Dashboards</i>	Padronização digital das instruções de trabalho; Apoio visual e por voz em tempo real; Monitorização da conformidade das tarefas.
Heijunka	<i>Machine Learning</i> ERP MES <i>Digital Twins</i>	Nivelamento da produção com previsões automáticas e simulações digitais; Otimização de fluxos de trabalho.
DMAIC / PDCA / Ishikawa / Pareto	<i>Big Data Analytics</i> <i>Digital Twins</i> <i>Dashboards</i> AI	Análise de causas e efeitos com dados massivos; Simulações digitais para experimentação de soluções; Visualização automática de causas prioritárias.
Andon	IIoT MES <i>Dashboards</i> <i>Cobots</i>	Sinalização automática de alertas de produção; Integração com sistemas de resposta rápida e manutenção assistida.

Sassanelli et al. (2021), demonstram que a aplicação do VSM e do *Kanban* permite às PME uma otimização dos fluxos de valor e uma maior eficiência na gestão de inventários e de produção. Da mesma forma, Ammirato et al. (2023) evidencia que a utilização das metodologias *Lean*, em particular o 5S, o *Kaizen* e o JIT, possibilita a redução significativa de desperdícios e o aumento da produtividade, sendo especialmente relevantes para empresas que enfrentam restrições de recursos e capacidade de investimento.

A ferramenta 5 *Whys*, o Diagrama de *Ishikawa*, o Diagrama de Pareto, a metodologia A3, o ciclo DMAIC, a análise de gargalos e o *Gemba Walk* são essenciais para a identificação sistemática de causas-raiz, a resolução estruturada de problemas e a mitigação de riscos operacionais. Carvalho et al. (2024) destaca, por exemplo, a importância do DMAIC no contexto da qualidade 4.0, demonstrando que esta metodologia pode ser adaptadas e potencializadas pelas tecnologias digitais, sobretudo pela integração de dados em tempo real e pela automação de análises. No estudo de Kihel (2022) é salientado que a combinação entre as ferramentas *Lean* tradicionais e as tecnologias digitais oferece uma abordagem sinérgica, na qual os métodos de resolução de problemas continuam a desempenhar um papel central. O autor refere que o *Gemba Walk*, aliado a sistemas digitais de recolha de dados, permite uma monitorização mais eficaz dos processos e uma resposta mais célere a desvios e anomalias, contribuindo para a MC e para a inovação organizacional.

Ferramentas como o SMED, o TPM, o *Takt Time*, o *Jidoka* e o *Andon* têm como objetivo central a estabilização dos fluxos de produção, a redução de tempos de preparação e a maximização da eficiência global dos equipamentos. Nos artigos de Kunju et al. (2022) e de X. Chen et al. (2023), verifica-se que a implementação de práticas como o TPM, o SMED e o *Jidoka*, quando aliadas a tecnologias digitais, resultam em melhorias substanciais na fiabilidade operacional, na redução de paragens não planeadas e na melhoria da manutenção preditiva.

A ferramenta 5S, que se foca na organização, limpeza e padronização dos postos de trabalho, tem vindo a ser amplamente apoiada por tecnologias como a IoT, sensores inteligentes, RA e RV, sistemas MES e *dashboards* digitais. A integração destas tecnologias permite a monitorização contínua do estado dos postos de trabalho, com sensores que detetam automaticamente situações de desorganização ou incumprimento dos padrões estabelecidos. Além disso, a RA tem sido utilizada para fornecer instruções digitais de organização e para realizar auditorias virtuais, facilitando a manutenção dos princípios do 5S.

No caso do *Kaizen*, a MC é reforçada pelo uso de *digital twins*, *machine learning*, RA e *big data analytics*. Estas tecnologias permitem que as equipas realizem simulações digitais de melhorias antes de as implementarem fisicamente, reduzindo riscos e otimizando os resultados. Os ciclos de melhoria *Kaizen* tornam-se mais rápidos e eficazes, uma vez que os dados recolhidos e analisados em tempo real apoiam as decisões, enquanto as ferramentas de simulação permitem visualizar previamente os impactos de cada melhoria proposta.

O VSM, utilizado para mapear e otimizar os fluxos de valor, tem sido intensamente associado a tecnologias como IIoT, *Big Data Analytics*, *cloud computing*, sistemas MES e *Machine Learning*. Estas ferramentas permitem a digitalização completa do mapeamento dos fluxos de valor, possibilitando a recolha e análise automática de dados sobre tempos de ciclo, desperdícios e gargalos. Os fluxos produtivos passam a ser visualizados em tempo real, facilitando intervenções rápidas e precisas para a sua MC.

O JIT, cuja finalidade é alinhar a produção com a procura, é amplificado pelo uso de sistemas MES e ERP, *Big Data Analytics*, *Machine Learning* e IIoT. A integração destas tecnologias permite ajustar automaticamente os volumes de produção às variações da procura, com base em previsões geradas por algoritmos de AI, ao mesmo tempo que os níveis de *stocks* são monitorizados e controlados digitalmente.

De forma semelhante, o *Kanban* tem evoluído para versões digitais, suportadas por sistemas ERP e MES, IIoT, *cloud computing* e *dashboards* digitais. A implementação do *Kanban* digital permite o controlo remoto e automatizado dos fluxos de materiais, eliminando a necessidade de cartões físicos e aumentando a eficiência e a flexibilidade dos processos produtivos.

O TPM, tradicionalmente utilizado para maximizar a eficiência dos equipamentos, é reforçado pela integração com IIoT, *Machine Learning*, MES e *Digital Twins*. Os sensores permitem a monitorização preditiva da condição das máquinas, enquanto os algoritmos de aprendizagem automática analisam os dados para programar manutenções preventivas de forma otimizada. Os *digital twins*, por sua vez, simulam os comportamentos dos equipamentos, facilitando a planificação de intervenções com base em dados preditivos.

A metodologia *Poka-Yoke*, destinada à prevenção de erros, também tem sido amplamente digitalizada. Tecnologias como a visão por computador, IIoT, sensores inteligentes e *cobots* são utilizadas para detetar falhas automaticamente e prevenir erros humanos. Estas tecnologias permitem a inspeção automática dos produtos e processos, aumentando a robustez e a fiabilidade dos sistemas de controlo de qualidade.

O *Standard Work*, que visa a padronização das tarefas, beneficia do suporte de sistemas MES, dispositivos vestíveis (*wearables*), AR/VR e *dashboards* digitais. Estas tecnologias facilitam a definição e execução dos padrões operacionais, oferecendo instruções digitais interativas e assegurando a conformidade através de monitorização em tempo real. Os operadores recebem assistência imediata durante a execução das tarefas, o que melhora a consistência e a eficiência.

O *Heijunka*, que tem como objetivo nivelar a produção, é cada vez mais aplicado com o suporte de *Machine Learning*, ERP, MES e *Digital Twins*. Os algoritmos permitem prever a procura e ajustar os planos de produção, enquanto os *digital twins* simulam o fluxo produtivo, identificando oportunidades para nivelamento e otimização.

As ferramentas de análise e resolução de problemas, como DMAIC, PDCA, Diagrama de *Ishikawa* e Diagrama de Pareto, também têm sido potenciadas pela digitalização. *Big data Analytics*, *digital twins*, *dashboards* interativos e algoritmos de AI permitem a análise detalhada de grandes volumes de dados, facilitando a identificação das causas dos problemas e a experimentação virtual de soluções, acelerando o ciclo de resolução de problemas. Por fim, o sistema *Andon*, utilizado para sinalização visual de incidentes e falhas no processo produtivo, é frequentemente digitalizado através de IIoT, MES, *dashboards* digitais e robótica colaborativa. Os alertas são gerados automaticamente e integrados em sistemas de resposta rápida, facilitando a comunicação e a intervenção imediata no chão de fábrica.

Como já referido, no domínio das tecnologias de automação e controlo, incluem-se os sistemas SCADA, os PLC avançados, os DCS, as HMI inteligentes e a robótica colaborativa (*cobots*). Estas ferramentas desempenham um papel crucial na automação de processos, na recolha e análise de dados em tempo real e na interação eficiente entre operadores humanos e sistemas automatizados. O artigo de Spaltini et al. (2024) apresenta um caso ilustrativo desta integração, no qual a utilização de sistemas SCADA, combinada com sensores inteligentes e sistemas de RA, resultou na eliminação de criticidades identificadas numa empresa industrial. Neste estudo, as tecnologias de automação foram determinantes para a monitorização contínua dos processos e para a validação automática das tarefas, contribuindo para a redução de erros humanos e para a melhoria da qualidade e da rastreabilidade.

O estudo Zhang et al. (2024) evidencia igualmente os benefícios das tecnologias de automação e controlo, demonstrando que a integração de robótica colaborativa e sistemas SCADA possibilita a execução de projetos mais eficientes, precisos e sustentáveis no setor

da construção. Neste contexto, as ferramentas digitais não apenas automatizam processos, como também suportam a tomada de decisão informada, melhorando a gestão de riscos e a alocação de recursos.

As soluções de IIoT incluídas na matriz abrangem sensores inteligentes e atuadores conectados, *gateways* IIoT, plataformas de gestão IIoT, sistemas de rastreabilidade RFID e tecnologias de localização, e soluções de *edge computing*. Estas ferramentas permitem a recolha e o processamento descentralizado de grandes volumes de dados operacionais, viabilizando a monitorização remota, a manutenção preditiva e a otimização em tempo real dos sistemas produtivos.

Nos artigos de Casciani & D'Itria (2024) e Ferreira et al. (2023), observa-se que as soluções IIoT são fundamentais para a transformação digital das cadeias de valor. O estudo de Casciani & D'Itria (2024), focado na indústria da moda, demonstra que a utilização de plataformas de gestão IIoT e tecnologias de rastreabilidade RFID proporciona uma transparência total ao longo da cadeia de abastecimento, permitindo a rastreabilidade de materiais e a implementação de práticas de economia circular.

Por seu lado, Ferreira et al. (2023) evidencia que as soluções IIoT contribuem significativamente para a eficiência energética, a redução de desperdícios e a otimização do desempenho ambiental e social, reforçando a importância destas tecnologias para a sustentabilidade empresarial.

A análise integrada da matriz e dos artigos permite concluir que a integração entre ferramentas de MC e tecnologias de digitalização constitui um eixo estratégico fundamental para a competitividade industrial. Sassanelli et al. (2021) e Ammirato et al. (2023) demonstram que a combinação entre práticas *Lean*, como o VSM e o *Kanban*, e tecnologias digitais, como a IoT e a AI, conduz a melhorias substanciais na eficiência operacional, na qualidade e na sustentabilidade. Estas sinergias permitem não apenas a redução de desperdícios, mas também a criação de sistemas produtivos mais resilientes e adaptativos, capazes de responder a exigências crescentes de flexibilidade e personalização.

Carvalho et al. (2024) e Tobon-Valencia et al. (2022) evidenciam que a digitalização amplifica o impacto das metodologias tradicionais de MC, ao automatizar tarefas repetitivas, acelerar a análise de dados e permitir a antecipação de problemas. Os autores referem que a utilização combinada de ferramentas *Lean* e tecnologias digitais contribui para a criação de processos mais robustos, transparentes e ágeis, facilitando a MC e a inovação incremental.

Por outro lado, Kihel (2022) e X. Chen et al. (2023) sublinham que a transformação digital deve ser acompanhada por uma abordagem sociotécnica, que valorize simultaneamente as tecnologias e os fatores humanos. A cultura de MC, o envolvimento dos trabalhadores e a capacitação digital são identificados como elementos-chave para o sucesso da integração entre ferramentas *Lean* e soluções digitais. Neste sentido, os autores reforçam que a digitalização deve ser encarada como um catalisador da MC, e não como um substituto das práticas organizacionais estabelecidas.

A digitalização tem vindo a transformar profundamente a aplicação das ferramentas de MC, permitindo a recolha e análise de dados em tempo real, a simulação virtual de cenários de melhoria, a automação de processos de decisão e a monitorização remota dos fluxos de produção. Esta convergência entre o *Lean* e as tecnologias digitais não só aumenta a eficiência operacional, como também oferece maior flexibilidade e capacidade de adaptação aos sistemas produtivos contemporâneos. Em suma, a análise realizada demonstra que a integração entre ferramentas de MC e ferramentas de digitalização não apenas é possível, como é muito desejável e necessária no atual contexto industrial. Esta integração fomenta a criação de sistemas de produção inteligentes, resilientes e sustentáveis, nos quais a eficiência, a qualidade e a inovação se reforçam mutuamente. Contudo, o sucesso desta abordagem depende de uma implementação estratégica, gradual e alinhada com a cultura organizacional, bem como de um compromisso firme com a capacitação e o desenvolvimento contínuo dos trabalhadores.

5. Perspetivas da Transição Digital nas PME Portuguesas

No presente estudo, com o intuito de complementar os dados obtidos pela implementação da RSL e de forma a validar empiricamente as tendências identificadas, foram realizadas entrevistas estruturadas a um conjunto de nove profissionais em cargos de liderança no setor industrial português. Assim, este capítulo está dividido em três secções. A primeira secção corresponde à caracterização dos entrevistados, a segunda secção corresponde à transcrição e análise qualitativa das respostas obtidas e, por fim, na terceira secção apresenta-se uma análise computacional das percepções dos profissionais através de ferramentas de *Sentiment Analysis*, que assentam em técnicas de NLP.

5.1. Caracterização dos Entrevistados

Como referido na secção 1.3.3., foram realizadas entrevistas estruturadas a profissionais da indústria para obter as suas percepções sobre a transição digital e o seu impacto na implementação das ferramentas de MC. A opção por entrevistar profissionais da indústria justifica-se pela sua experiência prática, conhecimento aplicado e visão estratégica sobre o contexto real. O acompanhamento dos processos organizacionais permite-lhes fornecer perspetivas fundamentadas, atualizadas e orientadas para a prática, o que enriquece a compreensão dos temas abordados na presente investigação.

Além disso, os profissionais entrevistados são agentes ativos na tomada de decisão e na implementação de estratégias, políticas e tecnologias nas respetivas empresas onde trabalham. Este contacto direto com os desafios e oportunidades enfrentados no terreno garante que as respostas obtidas refletem a realidade prática e não apenas conceções teóricas.

A escolha por entrevistas estruturadas visa garantir a comparabilidade das respostas, assegurando uma recolha de dados sistemática e consistente (guião fechado), facilitando a análise dos padrões de resposta entre os diferentes entrevistados. Deste modo, foram efetuados convites à participação a diferentes profissionais, sobretudo pertencentes a setores comuns aos da RSL.

Estes convites foram aceites por nove participantes. A análise das respostas pretende obter percepções realista dos tópicos em investigação, com contributos relevantes para a academia e para a prática profissional, no contexto das PME portuguesas.

Importa salientar que todos os entrevistados assinaram a declaração de consentimento de participação voluntária neste estudo, declaração que assegura que a sua participação é anónima e confidencial, e as informações recolhidas destinam-se exclusivamente a fins de investigação académica.

A Tabela 14 apresenta a caracterização sociodemográfica do grupo de entrevistados, distribuídos segundo três variáveis de caracterização: a faixa etária, anos de experiência profissional e setor de atividade da empresa onde estes realizam funções em áreas de Engenharia de Produção, Gestão Industrial ou áreas afins.

Tabela 14: Caracterização sociodemográfica dos entrevistados.

ID	Idade	Experiência	Setor Atividade
1	>55	>10 anos	Automóvel
2	25-34	1-5 anos	Têxtil
3	25-34	1-5 anos	Automóvel
4	35-44	6-10 anos	Metalomecânica
5	>55	>10 anos	Metalomecânica
6	35-44	1-5 anos	Construção
7	25-34	1-5 anos	Energético
8	35-44	>10 anos	Têxtil
9	35-44	>10 anos	Têxtil

No que respeita à idade, a faixa com maior número de participantes (quatro participantes) é a compreendida entre 35-44 anos, a faixa de idade de 25-34 anos inclui três participantes. Dois participantes têm mais de 55 anos.

Relativamente à experiência profissional, quatro profissionais têm entre 1 a 5 anos de experiência, um profissional tem entre 6 e 10 anos de experiência e quatro têm mais de 10 anos de experiência.

Quanto ao setor de atividade, o setor automóvel, o setor da metalomecânica e o setor têxtil, são representados por dois participantes, cada. Os restantes pertencem aos setores da construção e energia (um participante em cada). Esta distribuição evidencia a heterogeneidade do grupo em termos de idade, percurso profissional e enquadramento setorial, sendo relevante para interpretar possíveis padrões ou perspetivas distintas associadas à experiência profissional em diferentes contextos industriais. Doravante, os entrevistados são identificados pela codificação numérica de 1 a 9.

5.2. Análise Qualitativa das Entrevistas

O guião das dez questões efetuadas aos participantes apresenta-se no Apêndice 5. As entrevistas incluíram várias questões temáticas relativamente à transição digital e sobre a adoção de ferramentas de MC. A Tabela 15 apresenta a transcrição das respostas dos entrevistados sobre as percepções à forma como as empresas têm lidado com a transição digital. As entrevistas foram realizadas via videoconferência (Zoom). O tempo de pergunta/resposta por entrevista teve uma duração média de 15 minutos.

Tabela 15: Transcrição das respostas sobre a transição digital na empresa.

ID	Q1 - Como descreveria a forma como a sua empresa tem lidado com a transição digital?
1	Ainda num estado incipiente, mas com confiança no progresso da transição.
2	Entusiasmo.
3	Receio.
4	A sua implementação tem sido gradual de forma consistente e ponderada, tentando tornar os aspetos de redução de papel em todos os departamentos.
5	A transição nos serviços administrativos tem sido bem-sucedida, mas a nível da produção é muito mais difícil não só pelos custos dos equipamentos como na preparação exigida para a sua manobra e manutenção.
6	Confiança em realizar a introdução digital na fábrica, ainda estamos numa fase inicial de implementação.
7	Lentamente.
8	Confiança, necessidade.
9	Com entusiasmo, mas também com receio e algumas questões.

As respostas evidenciam uma variedade de experiências e sentimentos, que refletem diferentes estágios de maturidade digital, bem como os desafios e expectativas associados ao processo. A maioria das respostas indica que a transição digital está ainda numa fase inicial ou a decorrer de forma gradual, mas com níveis diversos de confiança quanto ao seu progresso. Alguns participantes manifestam confiança e otimismo, reconhecendo a necessidade da digitalização e a sua implementação faseada e ponderada. Uma das respostas destaca, por exemplo, a adoção de práticas como a redução de papel em todos os departamentos, sinalizando uma abordagem sistemática e estruturada.

Por outro lado, surgem também sentimentos contraditórios, como "receio e confiança", que revelam as tensões próprias de processos de mudança organizacional. A

difficuldade da digitalização na área da produção é salientada por um dos inquiridos, referindo obstáculos como os custos associados aos equipamentos e a complexidade da sua operação e manutenção, o que contrasta com a percepção mais positiva da transição nos serviços administrativos. Há ainda menções explícitas a "entusiasmo" e a uma evolução lenta, o que demonstra que, embora exista reconhecimento da importância da transição digital, a sua concretização varia consoante os contextos organizacionais, os recursos disponíveis e o nível de preparação interna. A análise das respostas revela que, apesar de se encontrarem em diferentes estágios de desenvolvimento digital, as empresas representadas pelos participantes demonstram, em geral, uma abertura positiva ao processo de transformação, embora marcada por desafios práticos e emocionais que condicionam o ritmo e a profundidade da sua implementação.

A Tabela 16 apresenta a transcrição das respostas dos entrevistados sobre a percepção da forma como a transição digital tem sido percebida no chão-de-fábrica. As respostas evidenciam um cenário predominantemente marcado por resistência, insegurança e receio face à mudança tecnológica. De forma geral, verifica-se que a maioria das respostas aponta para uma receção cautelosa e por vezes negativa, com expressões como “receio”, “desconfiança numa fase inicial”, “desconforto” e “barreiras à mudança” a surgirem de forma repetida.

Tabela 16: Transcrição das respostas sobre a receção da transição digital no chão-de-fábrica.

ID	Q2 - Como considera que a transição digital tem sido recebida pelo chão de fábrica?
1	Ainda num estado incipiente, mas com confiança no progresso da transição.
2	Receio.
3	Receio.
4	No chão-de-fábrica as medidas de redução de papel através da digitalização da informação foram adotadas com grande sucesso e facilidade pelos colaboradores com aptidões informáticas.
5	Essa é a parte mais fácil, penso eu! Desde que seja bem-apresentada e explicada; e desde que venha trazer um benefício real e palpável para descomplicar uma qualquer tarefa... porque se não for para ajudar a proposta vai ser rejeitada de imediato.
6	Desconfiança numa fase inicial.
7	Desconforto.
8	Com receio e algumas barreiras à mudança.
9	Receio e desconfiança.

As respostas dos entrevistados estão alinhadas com a análise crítica da literatura apresentada na secção 4.3.4. Os operacionais, menos expostos à inovação tecnológica, encaram a digitalização com apreensão, por receios relacionados com a substituição de tarefas, a complexidade das novas ferramentas ou a falta de competências digitais.

Apesar deste panorama de reserva, também se identificam perspetivas mais positivas, embora condicionadas a determinados fatores. Um dos participantes refere que, quando a digitalização é apresentada de forma clara, explicada adequadamente e associada a benefícios concretos, como a simplificação de tarefas, a aceitação tende a ser facilitada. Esta visão pragmática reforça a importância de uma comunicação eficaz e de uma abordagem centrada no utilizador final para garantir o êxito da transição digital. Outro contributo menciona que a digitalização da informação no contexto da redução do uso de papel foi bem-sucedida, especialmente entre os colaboradores com maior literacia digital, o que evidencia a influência das competências individuais na forma como a mudança é experienciada. A aceitação da transição digital no chão-de-fábrica depende da forma como é implementada, das capacidades dos trabalhadores e da perceção de utilidade prática associada às novas soluções tecnológicas.

Quanto às ferramentas de MC mais aplicadas no contexto digital, foram destacadas as ferramentas *Kaizen*, o *Kanban*, a digitalização de formulários e o uso de software de monitorização. Como é possível verificar na Tabela 17.

Tabela 17: Transcrição das respostas sobre a as ferramentas de MC mais aplicadas.

ID	Q3 - Quais as ferramentas de MC que têm sido mais aplicadas na adaptação digital da empresa?
1	As ferramentas de MC aplicadas ainda estão na fase de definição... lápis e papel.
2	Metodologia <i>Kaizen</i> .
3	<i>Kanban</i> .
4	Digitalização de formulários de registo a todos os níveis de informação.
5	<i>Software</i> de controlo de obras, planificação e gestão de obras e lentamente também a apresentação de <i>software</i> de modelação e preparação para impressão 3D e início de manufatura aditiva com impressão de misturas cimentícias.
6	Digitalização (eliminação do papel), <i>dashboards</i> , implementação de KPI, sistemas <i>Andon</i> , inspeção visual do produto, empacotadoras automáticas.
7	Digitalização dos KPI e <i>dashboard</i> digitais.
8	<i>Lean Manufacturing</i> , <i>shop-floor control</i> , sistema de gestão de energia.
9	Cultura de inovação, sistema de documentação em <i>cloud</i> .

Algumas organizações ainda se encontram numa fase embrionária da transição digital, com a aplicação das ferramentas de MC a decorrer de forma manual e tradicional, conforme indicado pela expressão “ainda com papel e lápis”. Este dado evidencia que, apesar da crescente pressão para digitalizar processos, a transição digital permanece incipiente em certos contextos, carecendo de investimento e reestruturação metodológica.

Por outro lado, destacam-se várias iniciativas concretas de digitalização alinhadas com os princípios da MC, com particular incidência na automatização da recolha de dados e visualização da informação. Foram referidos, por exemplo, a digitalização de formulários de registo, a implementação de *dashboards* digitais e a digitalização de KPI, práticas que contribuem para aumentar a transparência operacional e suportar decisões baseadas em dados, pilares fundamentais da Indústria 4.0.

Adicionalmente, surgem referências explícitas a ferramentas de MC, como o *Kaizen* e o *Kanban*, bem como a aplicação do *Lean Manufacturing* e de sistemas de *shop-floor control* e gestão energética, os quais têm sido reforçados por soluções digitais que visam monitorizar e otimizar os processos em tempo real. Algumas empresas vão ainda mais longe, incorporando tecnologias emergentes como *software* de modelação, preparação para impressão 3D e início de manufatura aditiva com materiais cimentícios, o que indica uma integração progressiva entre ferramentas de MC e inovação tecnológica avançada.

Por fim, a menção a elementos como os sistemas *Andon*, a inspeção visual digital e a automatização de empacotamento reforçam a orientação para a digitalização do chão de fábrica, com enfoque na eficiência operacional, controlo de qualidade e resposta imediata a anomalias.

A Tabela 18 compila as percepções dos participantes relativamente à eficácia das ferramentas de MC no contexto atual da transformação digital, revelando uma diversidade de opiniões que refletem diferentes níveis de maturidade organizacional, experiências práticas e sensibilidades humanas perante a mudança tecnológica. Vários participantes expressam confiança na eficácia destas ferramentas quando integradas em ambientes digitalizados. Uma das respostas caracteriza a sua aplicação como um sucesso, salientando a melhoria na consulta da informação de forma mais assertiva e rápida, o que evidencia o impacto positivo da digitalização na eficiência da comunicação e na tomada de decisão. É destacada a percepção de que a transformação digital, aliada às ferramentas de MC representa uma necessidade para a indústria atual, reforçando o seu papel estratégico na competitividade e na modernização dos processos.

Tabela 18: Transcrição das respostas sobre a eficácia das ferramentas de MC.

ID	Q4 - Qual a percepção sobre a eficácia das ferramentas de MC no contexto atual de transformação digital?
1	No contexto da transformação digital ainda não há percepção da eficácia.
2	Confiança.
3	Confiança.
4	As ferramentas têm sido um sucesso positivo para melhoria da consulta da informação de forma mais assertiva e rápida.
5	A transformação digital tem sempre que surgir depois da aposta na transformação da educação e mudança de paradigma cultural, onde se possa dar mais atenção à preparação escolar para um melhor desempenho profissional posterior.
6	Depende das pessoas e dos postos de trabalho, mas receio numa fase inicial a existência de mais controlo e pressão sobre os trabalhadores. Mas também se verifica entusiasmo quando se apercebem que torna as tarefas mais fáceis e seguras, para além de espelhar e valorizar o trabalho das pessoas.
7	Rápidos e eficientes.
8	Percepção de que é uma necessidade para a indústria.
9	Confiança.

Contudo, outras respostas introduzem uma visão mais crítica e reflexiva, alertando para questões estruturais e humanas que condicionam a eficácia das ferramentas neste novo contexto. Um entrevistado salienta que a transformação digital só pode ser eficaz se for precedida por uma transformação educativa e cultural, o que implica o reforço da preparação escolar e a mudança de paradigma nas qualificações profissionais. Esta perspetiva sublinha que a eficácia das ferramentas não depende exclusivamente da tecnologia, mas também da capacidade das pessoas e organizações em adaptarem-se ao novo modelo digital.

Há ainda quem refira uma reação contraditória por parte dos colaboradores, oscilando entre receio inicial, motivado pela percepção de maior controlo e pressão, e entusiasmo subsequente, ao reconhecerem os benefícios em termos de facilidade, segurança e valorização do seu trabalho. Uma resposta destaca que os processos se tornaram “rápidos e eficientes”, reforçando a ideia de que a digitalização pode potenciar os objetivos tradicionais da MC, como a redução de desperdícios, a padronização e a qualidade operacional.

A Tabela 19 apresenta a transcrição das respostas dos entrevistados sobre as percepções do impacto das tecnologias digitais nos processos de MC.

Tabela 19: Transcrição das respostas sobre o impacto das tecnologias digitais nos processos de MC.

ID	Q5 - A introdução de tecnologias digitais tem melhorado ou dificultado os processos de MC?
1	Não tem noção.
2	Melhorado, através da automatização dos processos.
3	Melhorado, a gerir o planeamento diário das tarefas.
4	Melhorado. Através da facilidade do cálculo dos KPI e controlo dos mesmos.
5	Só existe MC se nós melhorarmos a nossa postura em relação ao modo como aprendemos e depois aplicamos na nossa vida pessoal e profissional... se não formos capazes dessa transformação, de nada vai servir qualquer processo de MC.
6	Melhorado, pois torna mais simples e automática a implementação e a monitorização.
7	Tem melhorado, permitem acesso às informações na palma da mão, à distância de um clique!
8	Grande facilitador no que à MC diz respeito.
9	Melhorado.

Com a exceção de uma resposta, oito dos entrevistados afirmam que a introdução de tecnologias digitais tem melhorado os processos de MC. De acordo com as respostas obtidas, a introdução das tecnologias digitais tem contribuído através da automatização dos processos, da melhoria do planeamento das tarefas, da facilitação no cálculo de KPI e no acesso à informação em tempo real e “na palma da mão”.

As quatro perguntas seguintes visaram identificar a percepção dos entrevistados no que diz respeito ao impacto da digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* nos níveis de produtividade (Q6), na qualidade dos processos e dos produtos (Q7), na sustentabilidade ambiental ou energética (Q8) e em relação ao fator humano, ou seja, o bem-estar e motivação dos colaboradores (Q9).

A Tabela 20 apresenta as respostas relativas ao impacto da digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* nos níveis de produtividade das empresas. Uma das respostas indica que a empresa ainda se encontra numa fase incipiente, utilizando métodos tradicionais, como “papel e lápis”, o que impossibilita, por ora, uma conclusão sólida sobre os efeitos da digitalização. Esta resposta sugere que, em alguns contextos, a transição digital ainda está em curso ou por iniciar, e que os benefícios esperados permanecem latentes ou por confirmar.

Tabela 20: Transcrição das respostas sobre o a digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* nos níveis de produtividade.

ID	Q6 - PRODUTIVIDADE: Como tem impactado a digitalização das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> nos níveis de produtividade da empresa?
1	Ainda é cedo para poder concluir, dado que estamos na fase do "papel e lápis".
2	Aumento da produtividade, monitorização de dados análise dos resultados.
3	Tem um impacto positivo.
4	Facilita os processos de controlo.
5	O aumento de produtividade é inicialmente subjetivo e lentamente impõe-se pela realidade, quando é palpável a diferença é aceite sem contestação.
6	Permitiu a monitorização dos indicadores nos departamentos de Qualidade, Manutenção e Produção (OEE).
7	Permite o seguimento diário e instantâneo dos KPI.
8	Maior clareza dos processos, interação mais eficaz entre a gestão e o chão-de-fábrica.
9	Aumentou dos indicadores de produtividade.

A maioria dos entrevistados evidencia ganhos efetivos em termos de indicadores de produtividade, realçando a importância da digitalização na monitorização de dados e na análise de resultados, o que representa um incremento quando comparada com aos métodos convencionais de controlo. As respostas referem a facilitação na análise dos processos, monitorização em tempo real dos KPI e maior interação entre a gestão e o chão-de-fábrica, sinalizando que a digitalização das ferramentas *Lean* contribui para aumentar a transparência operacional, a agilidade na resposta e a tomada de decisão baseada em evidência.

Algumas respostas assumem um tom mais reflexivo, referindo que o aumento de produtividade é inicialmente percecionado de forma subjetiva, mas que, com o tempo e à medida que os resultados se tornam tangíveis e palpáveis, a sua aceitação torna-se generalizada. Isto demonstra que a percepção de impacto positivo não depende apenas da implementação técnica das ferramentas, mas também da comprovação prática dos seus efeitos no quotidiano organizacional.

Adicionalmente, há menção específica aos departamentos de Qualidade, Manutenção e Produção, com destaque para a utilização do indicador OEE, evidenciando uma aplicação concreta das ferramentas digitais para monitorizar e otimizar a eficiência global dos equipamentos, o que é coerente com os princípios do *Lean Manufacturing*.

No que respeita à qualidade, os entrevistados foram unânimes em reconhecer que a digitalização das ferramentas *Lean* tem contribuído para a melhoria dos processos e produtos como espelhado na Tabela 21.

Tabela 21: Transcrição das respostas sobre o a digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* na qualidade de processo e produto.

ID	Q7 - QUALIDADE: Considera que a integração digital das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> tem contribuído para a melhoria da qualidade dos processos e dos produtos?
1	Mais uma vez, as ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> estão na fase de definição e adaptação à cadeia de valor em causa e, como tal, ainda não estão integradas digitalmente.
2	Análise dos processos.
3	Sim, através da qualidade de informação.
4	Sim, através de uma consulta dos KPI facilitada.
5	De um modo geral, considero que traz resultados, embora para ser aceite por todos, e sem contestação, mereça um cuidado de explicação e implementação rigorosa.
6	Sim, o sistema de inspeção de soldas permite um apoio à qualidade do processo.
7	Sim. Maior eficiência dos processos e registo de dados fiáveis.
8	Sim, pois permitem de uma forma mais rápida "atacar" e "mitigar" os problemas qualitativos.
9	Sim, evita erros.

Uma das respostas indica que, em alguns contextos, as ferramentas *Lean Manufacturing* ainda se encontram em fase de definição e adaptação à cadeia de valor específica, e, como tal, ainda não foram digitalmente integradas. Esta observação sugere que a maturidade digital varia consideravelmente entre as empresas, com algumas ainda em fase de planeamento ou transição.

Apesar desta limitação inicial, a maioria das respostas reconhece benefícios concretos decorrentes da digitalização, especialmente no que respeita à qualidade da informação, à análise de processos e à monitorização contínua de KPI. A consulta facilitada de dados e o acesso em tempo real a métricas relevantes são apontados como fatores decisivos para a melhoria da qualidade, uma vez que permitem uma resposta mais célere e fundamentada aos desvios e não conformidades.

Alguns participantes destacam que esta melhoria qualitativa depende da forma como a digitalização é conduzida, sendo essencial uma implementação rigorosa e bem

comunicada para garantir aceitação interna e eficácia sustentável. Esta preocupação com a gestão da mudança e o envolvimento dos colaboradores é coerente com os princípios da MC, nos quais a participação e compreensão de todos os níveis organizacionais são fundamentais. Destacam-se ainda exemplos práticos de ferramentas digitais aplicadas ao controlo da qualidade, como o sistema de inspeção de soldas, que reforça a contribuição da tecnologia para apoiar tecnicamente os processos críticos de fabrico. Adicionalmente, é referida a maior eficiência dos processos e a fiabilidade no registo de dados, elementos que, em conjunto, favorecem uma abordagem preventiva e reativa mais eficaz perante falhas de qualidade.

No que diz respeito à sustentabilidade ambiental e energética, as respostas foram menos expressivas (Tabela 22). Um dos impactos mais frequentemente referidos diz respeito à redução do consumo de papel, apontada como uma das consequências imediatas da digitalização. Várias respostas mencionam explicitamente a eliminação ou redução de consumíveis, como papel e impressos, o que traduz uma diminuição dos recursos físicos utilizados nas operações administrativas e produtivas.

Tabela 22: Transcrição das respostas sobre o a digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* na sustentabilidade ambiental e energética.

ID	Q8 - SUSTENTABILIDADE: Em que medida a digitalização da informação e das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> tem influenciado os esforços da empresa em termos de sustentabilidade ambiental ou energética?
1	Ainda num estado incipiente, mas com confiança no progresso da transição.
2	Poupança energética, menores tempos de transporte.
3	Diminuição de papel.
4	Redução de papel, impressos.
5	A política ambiental e energética tem de deixar de ser só um discurso bonito da classe política; tem de ser interiorizada e deve ser criado o sentido de compromisso (engajamento) evitando que se perca com práticas completamente negligentes.
6	Desconheço.
7	Redução de consumíveis como papéis, canetas, impressos...
8	Sistema de gestão de energia, como exemplo, permite-nos perceber onde podemos reduzir em termos energéticos, onde o planeamento <i>online</i> permite um maior agrupamento de ações e, com isso, menos gastos de água, por exemplo.
9	Desconheço.

Para além da vertente documental, outras respostas aludem a benefícios operacionais com impacto ambiental, como a poupança energética e a redução dos tempos e custos associados ao transporte, aspetos que, ao serem otimizados por via da digitalização e da aplicação das ferramentas *Lean*, contribuem diretamente para a diminuição da pegada ecológica da empresa.

Uma das respostas destaca a utilização de sistemas de gestão de energia, que, ao proporcionarem uma visão detalhada dos consumos energéticos, facilitam a identificação de desperdícios e a definição de ações corretivas, reforçando a articulação entre tecnologia, eficiência operacional e responsabilidade ambiental. É igualmente salientado o papel do planeamento digitalizado, que permite otimizar recursos como a água, nomeadamente através de um agrupamento mais racional das operações.

Importa ainda referir uma perspetiva crítica presente numa das respostas, que sublinha que os avanços tecnológicos e os discursos institucionais sobre sustentabilidade só serão eficazes se acompanhados por uma mudança de mentalidade e de práticas efetivas, tanto no plano individual como organizacional. Esta posição reforça a ideia de que a tecnologia, por si só, não garante sustentabilidade, sendo necessário um comprometimento real com a mudança de comportamentos e de cultura.

Quanto ao fator humano, tal como descrito na Tabela 23, a maioria dos entrevistados indicou que os colaboradores sentem inicialmente desconfiança face à digitalização. A desconfiança inicial está associada à perceção de controlo acrescido sobre o trabalho e ao receio de não conseguir acompanhar as novas exigências tecnológicas. Esta reação é particularmente acentuada entre os colaboradores com menores aptidões digitais, os quais se sentem inseguros, pressionados e, por vezes, resistentes à mudança, temendo pela sua capacidade de adaptação ou pela perda de autonomia no desempenho das suas funções. Assim, coexistem reações de desconfiança, entusiasmo, frustração e adaptação, fortemente condicionadas pelas competências digitais individuais e pela forma como a mudança é implementada.

Contudo, vários testemunhos evidenciam que, quando a digitalização é bem comunicada e associada a benefícios concretos, os colaboradores tendem a transitar da desconfiança para um estado de curiosidade, aceitação e até entusiasmo, reconhecendo o potencial das ferramentas para facilitar as tarefas. Esta reação positiva é mais evidente entre os colaboradores com maior familiaridade tecnológica, que demonstram motivação ao utilizar instrumentos como *dashboards*, questionários digitais e plataformas colaborativas, por exemplo plataformas como o *Microsoft Teams*.

Tabela 23: Transcrição das respostas sobre o a digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* em relação aos fatores humanos.

ID	Q9 - FATOR HUMANO: Como descreveria o impacto da digitalização das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> no bem-estar e motivação dos colaboradores e quais os sentimentos que predominam?
1	Ainda num estado incipiente, mas com confiança no progresso da transição.
2	Desconfiança no princípio, curiosidade no processo e entusiasmo.
3	Desconfiança.
4	Confiança e adaptação.
5	Desconfiança inicial, entusiasmo quando bem-apresentada e depois... frustração quando se vê que de nada ou pouco serve.
6	Sentem desconfiança inicialmente, pois sentem que estão a ser controlados. Para além disso, o facto de muitos não terem aptidões tecnológicas faz com que sintam frustração e receio de não se adaptarem e tentam resistir às mudanças implementadas. Já nos operadores com aptidão tecnológica, estes sentem que a digitalização de toda a informação necessária torna o processo mais prático e rápido e sentem entusiasmo com as novas ferramentas (<i>Microsoft Teams</i> , questionários, <i>dashboards</i>).
7	Desconfiança.
8	Maior interação com ferramentas tecnológicas, mais orientação.
9	Confiança e entusiasmo.

Algumas respostas, porém, denunciam uma frustração subsequente, que emerge quando as promessas de melhoria associadas à digitalização não se concretizam na prática; ou quando as ferramentas são introduzidas sem uma estratégia clara de integração e valorização do trabalho humano. Este sentimento aponta para a importância de garantir coerência entre os objetivos da digitalização e os benefícios reais percebidos pelos colaboradores, sob pena de comprometer o seu envolvimento. Colaboradores com melhores aptidões tecnológicas e uma orientação mais estruturada no desempenho das tarefas, pode traduzir-se num reforço da motivação e do bem-estar profissional.

A Tabela 24 identifica as respostas dadas relativamente aos indicadores utilizados, onde apenas foi mencionada a utilização de questionários e referências indiretas a respostas anteriores, o que sugere uma ausência de instrumentos quantitativos formais e uma necessidade de desenvolvimento de KPI específicos para monitorizar este tipo de transformação organizacional.

Tabela 24: Transcrição das respostas sobre os indicadores usados para medir a transição digital.

ID	Q10 - Que indicadores são utilizados na sua organização para medir o sucesso da transição digital?
1	Nenhum.
2	Questionários.
3	Nenhum.
4	Nenhum.
5	Ainda não temos um observatório para essas medições, mas estou em crer que vamos mudando as mentalidades com alguma perseverança... importa não desistir!
6	Não realizamos essa medição.
7	Desconheço.
8	OEE <i>online</i> ; rácio consumo de água sobre quilograma de tecido acabado; percentagem de vapor gerado pela biomassa versus gás natural.
9	Nenhum.

A maioria das respostas aponta para a inexistência de indicadores específicos, com expressões como “nenhum”, “não realizamos essa medição” ou “desconheço”, o que sugere que, apesar da crescente adoção de iniciativas digitais, estas não estão a ser acompanhadas por instrumentos de avaliação sistemáticos ou estruturados. Esta lacuna compromete a capacidade das organizações em aferir o impacto real da transição digital, tanto ao nível da eficiência operacional como da criação de valor, limitando também a fundamentação de decisões estratégicas e investimentos futuros.

A utilização de questionários é mencionada por um dos participantes, o que indica a presença de instrumentos de auscultação qualitativa, ainda que provavelmente orientados para a recolha de percepções e não para métricas objetivas e comparáveis ao longo do tempo. Trata-se, assim, de uma abordagem potencialmente útil numa fase exploratória, mas insuficiente como mecanismo de avaliação estruturada.

Uma resposta destaca a inexistência de um observatório interno para este fim, mas reconhece a importância de promover uma mudança cultural progressiva, expressando confiança de que, com perseverança, será possível construir uma visão mais consciente e estruturada sobre os benefícios e resultados da digitalização. Esta visão reflete a consciência da necessidade de evoluir para práticas mais robustas de gestão da transformação digital, mesmo que ainda não concretizadas.

5.2 Avaliação de Sentimentos com Técnicas de NLP

Como referido na secção 1.3.4., as ferramentas de *Sentiment Analysis*, visam o estudo computacional de opiniões, sentimentos e emoções, permitindo aos investigadores processar dados qualitativos, *e.g.*, respostas de entrevistas.

Para este estudo, a análise foi realizada utilizando o *software* Orange, uma plataforma de programação visual e de código aberto usada em *data mining*. O processo de *Sentiment Analysis* seguiu um fluxo de trabalho estruturado:

- Pré-processamento de texto: Limpeza dos dados textuais por meio da remoção de caracteres irrelevantes, correção de erros tipográficos e padronização da formatação.
- *Tokenization*: Os *widgets* do Orange convertem o texto em dados estruturados adequados para análise.
- Classificação de sentimentos: Aplicação de modelos pré-treinados incorporados ao *widget de Sentiment Analysis* do Orange para atribuição de classificação de polaridade, aplicando o método VADER. Este método, só permite o input de dados em língua inglesa, o que obrigou à tradução da transcrição das respostas das entrevistas.
- Categorização de Polaridade: Classificação de cada resposta dos entrevistados como positiva, neutra ou negativa.
- Visualização: Utilização das ferramentas integradas do Orange para mostrar distribuições de sentimentos e frequência de termos-chave (*wordcloud*) e mapas de polaridade de sentimento (*heatmaps*), apoiando interpretações analíticas.

Na realização desta análise foram excluídas as questões Q3 e Q10, uma vez que pedem a indicação da utilização de ferramentas e indicadores, não sendo questões ajustadas à análise da polaridade.

A Figura 24 ilustra os passos para analisar as respostas. Após a importação do conjunto de dados por meio do *widget* “File”, foram aplicados filtros “*Select Columns*” para isolar as respostas relevantes de cada questão. Esses conjuntos de dados filtrados foram processados por meio dos *widgets* “*Corpus*” e “*Preprocess Text*”, nos quais foram aplicadas etapas padrão de limpeza (conversão para minúsculas, remoção de *stopwords*, remoção de pontuação e *tokenization*).

O texto pré-processado foi então analisado utilizando o *widget* “*Sentiment Analysis*”, que aplicou a pontuação de sentimentos do VADER para classificar cada resposta como positiva, neutra ou negativa.

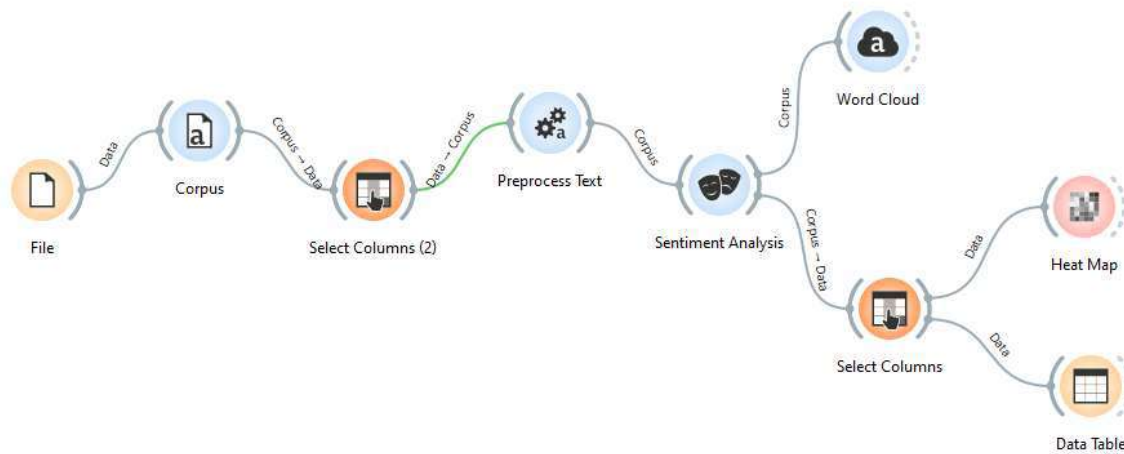


Figura 24: Fluxo do processamento do *Sentiment Analysis* no *Orange*.

A *wordcloud* da Figura 25 permite verificar uma predominância de sentimentos e conceitos associados ao processo de transição digital nas organizações (respostas à Q1). Termos como "confiança" e "entusiasmo" surgem com destaque, evidenciando uma percepção globalmente positiva por parte dos entrevistados em relação à implementação de mudanças tecnológicas. Estes sentimentos sugerem uma abertura à inovação e uma aposta na MC, indicando que, apesar dos desafios, existe motivação para avançar.

No entanto, a presença destacada da palavra "medo" evidencia uma tensão emocional no seio das equipas. Este receio parece estar associado ao início do processo de transição, refletindo incertezas sobre o impacto da digitalização nas rotinas de trabalho, na estabilidade das funções e no domínio de novas ferramentas. Esta dualidade entre confiança e receio, reforça a ideia de que o processo de transformação digital é, simultaneamente para a maioria dos entrevistados, uma oportunidade e um desafio.

Além disso, termos como "implementação", "transição", "gradual" e "inicial" indicam que as iniciativas digitais ainda se encontram numa fase embrionária ou em desenvolvimento, o que contribui para a coexistência de sentimentos opostos. Também são visíveis referências a "produção", "custos" e "manutenção", o que sugere que os obstáculos não são apenas emocionais, mas também operacionais. Em suma, a análise da *wordcloud* mostra que o processo de transição digital é percecionado como necessário e benéfico, mas exige cuidado na sua comunicação, preparação das equipas e gestão da mudança para que possa ser bem-sucedido.



Figura 25: *Wordcloud* da predominância de sentimento relativos à transição digital nas empresas.

Para analisar a questão Q2, “*Como considera que a transição digital tem sido recebida pelo chão de fábrica?*”, foi usado o *heatmap* da Figura 26. Importa esclarecer que as linhas correspondem à identificação de cada um dos entrevistados (de 1 a 9), enquanto as colunas (*negative*, *neutral*, *positive*) refletem os *scores*, usados para avaliar a polaridade emocional. As cores da escala variam entre tons de azul (0 - baixa intensidade do sentimento) e tons esverdeados (1 - alta intensidade do sentimento), permitindo uma leitura qualitativa e quantitativa da tendência emocional de cada resposta em cada coluna. O dendrograma à esquerda do gráfico permite visualizar o agrupamento dos entrevistados com base na semelhança dos seus sentimentos. O Apêndice 6 apresenta todas as pontuações de todas as questões analisadas pela *Sentiment Analysis*.

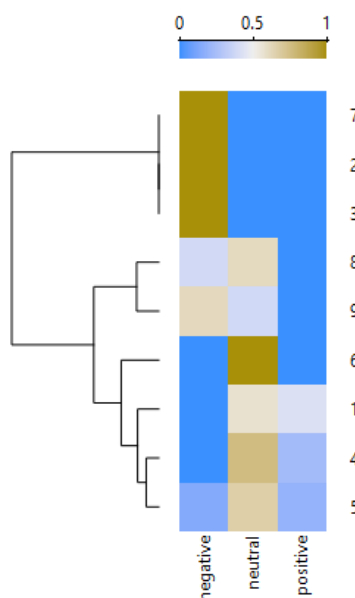


Figura 26: *Heatmap* do *Sentiment Analysis* realizada na Q2.

Os entrevistados 2, 3 e 7 apresentam um sentimento intensamente negativo, sugerindo uma forte insatisfação ou preocupação com o impacto da digitalização no ambiente fabril (polaridade negativa com pontuação de 1). Por outro lado, os entrevistados 1, 4, 6 e 8 demonstram um sentimento neutro. Os entrevistados 2, 3 formam um grupo coeso com percepções negativas de respostas, enquanto os entrevistados 4 e 5 parecem partilhar uma visão mais equilibrada ou neutra. Os resultados revelam que, na opinião dos entrevistados, a transição digital no chão-de-fábrica tem sido recebida com reserva, preocupação ou ceticismo. A análise evidencia um cenário de percepções díspares, mas com uma inclinação clara para sentimentos negativos ou neutros face às mudanças tecnológicas no ambiente fabril.

A Figura 27 representa um *heatmap*, resultante de uma análise de sentimentos aplicada às respostas à questão Q4: "*Qual a percepção sobre a eficácia das ferramentas de MC no contexto atual de transformação digital?*".

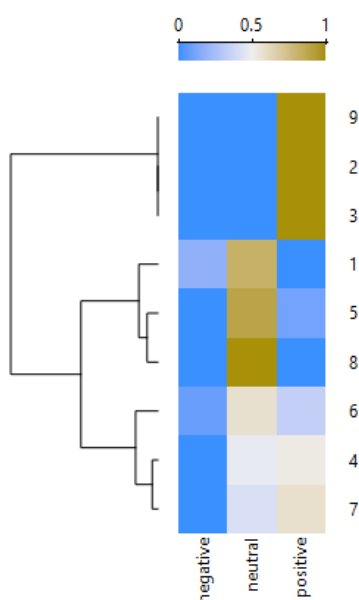


Figura 27: *Heatmap* do *Sentiment Analysis* realizada na Q4.

Observa-se a existência de dois grandes grupos de polaridade de resposta: um com respostas predominantemente positivas, e outro com respostas neutras polarizadas. Os entrevistados 2, 3 e 9 revelam sentimentos fortemente positivos sobre a eficácia das ferramentas de MC. Os entrevistados, 1, 5 e 8 tem posicionamentos demarcadamente mais neutros.

Outras respostas, como as dos entrevistados 4, 6 e 7, apresentam tonalidades mais suaves, indicando uma visão mais equilibrada e ponderada – nem fortemente entusiástica, nem crítica.

De forma geral, os sentimentos expressos nas respostas tendem a situar-se entre o neutro e o positivo. Isto revela que a maioria dos participantes reconhece alguma eficácia nas ferramentas de MC, embora esta percepção seja marcada por cautela ou experiências práticas diversas. Há ainda alguns casos de percepções mais negativas ou ambivalentes, o que poderá refletir desafios na implementação ou resistência à mudança no contexto da transformação digital. As respostas refletem uma valorização do potencial da MC, mas também revelam consciência crítica sobre os obstáculos e limitações que podem surgir na sua aplicação no atual cenário de transformação digital.

A Figura 28 representa um *heatmap*, resultante de uma análise de sentimentos aplicada às respostas sobre o impacto da introdução das tecnologias digitais nos processos de MC (Q5).

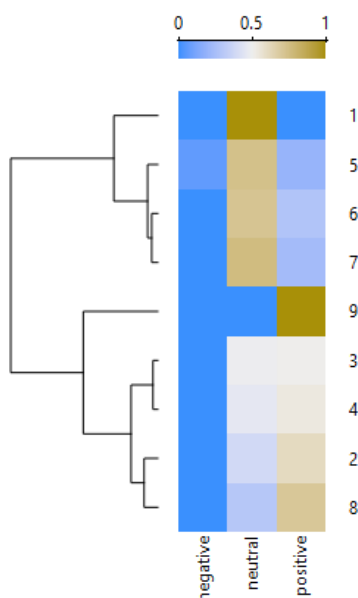


Figura 28: *Heatmap* do *Sentiment Analysis* realizada na Q5.

A análise evidencia uma diversidade de percepções entre os participantes: Os entrevistados 1, 5, 6 e 7 estão agrupadas devido a sentimentos semelhantes, predominantemente neutros. As respostas dos inquiridos 3, 4, 2 e 8 estão mais próximas umas das outras, com tendência neutra a positiva, ainda que com baixa intensidade. O entrevistado 9 tem uma percepção muito positiva.

Desta forma, esta análise suporta a tese de que a introdução de tecnologias digitais nos processos de MC é vista de forma ambígua, enquanto alguns relatam melhorias e benefícios, outros enfrentam dificuldades ou resistências, dependendo de fatores como contexto organizacional, familiaridade tecnológica e suporte à implementação.

Relativamente à análise do impacto da digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* nos níveis de produtividade (Q6), na qualidade dos processos e dos produtos (Q7), na sustentabilidade ambiental ou energética (Q8) e em relação ao fator humano (Q9), os dados foram rearranjados e efetuou-se uma análise comparativa entre estes diferentes aspetos, considerando todas as respostas dos entrevistados por questão, como apresentado na Figura 29.

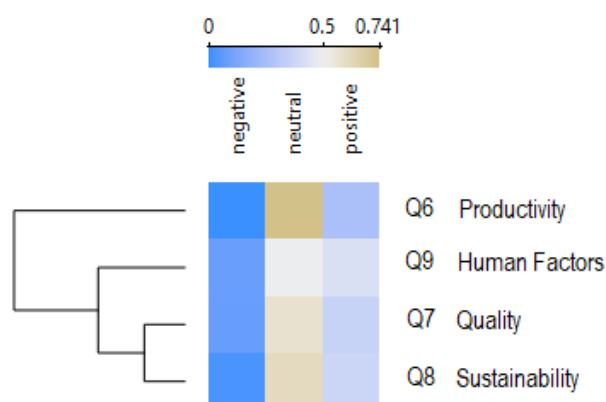


Figura 29: *Heatmap* do *Sentiment Analysis* realizada na Q6, Q7, Q8 e Q9.

No que diz respeito à Produtividade, os resultados da análise de sentimentos indicam uma percepção maioritariamente neutra. As respostas sugerem que a digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* tem sido vista como um fator facilitador do aumento da eficiência e desempenho operacional da empresa. A tonalidade ligeiramente positiva reflete um reconhecimento generalizado dos benefícios tangíveis, embora sem expressões de entusiasmo extremo. Esta percepção positiva destaca a produtividade como a dimensão mais valorizada no processo de transformação digital em curso.

No domínio da Qualidade, a percepção é neutra a ligeiramente positiva. As respostas revelam que os entrevistados reconhecem algum contributo da digitalização para a melhoria dos processos e produtos, mas não de forma enfática. Isso pode indicar que os efeitos positivos ainda estão em fase de consolidação ou que existem barreiras à sua plena concretização. A percepção morna pode refletir experiências variáveis entre áreas ou um entendimento ainda incipiente sobre o impacto direto das ferramentas digitais na qualidade.

Quanto à Sustentabilidade, a análise aponta para sentimentos predominantemente neutros ou levemente negativos. A digitalização das ferramentas *Lean Manufacturing* não é amplamente associada, pelos respondentes, a melhorias evidentes em termos de sustentabilidade ambiental ou energética. Isso pode refletir uma falta de visibilidade sobre os impactos positivos dessas tecnologias ou a ausência de uma estratégia clara que integre objetivos ambientais. Esta percepção sugere a necessidade de reforçar a comunicação interna e o alinhamento estratégico nesta área, caso a sustentabilidade seja, de facto, um objetivo corporativo.

Relativamente ao Fator Humano, os sentimentos expressos nas respostas tendem a ser neutros ou ligeiramente negativos. A análise sugere que a digitalização pode estar a gerar preocupações entre os colaboradores, possivelmente relacionadas com a adaptação às novas tecnologias, o aumento da carga de trabalho, ou a sensação de desumanização dos processos. A ausência de sentimentos claramente positivos indica que o impacto nas pessoas ainda não é percebido como benéfico, ou que há desafios relevantes que afetam o bem-estar e a motivação das equipas.

6. Considerações Finais

O presente capítulo reúne os principais resultados obtidos ao longo da investigação, com o objetivo de responder à pergunta de investigação e às respectivas sub-perguntas de investigação que nortearam este estudo. São também identificadas as limitações encontradas no desenvolvimento da dissertação e os contributos da dissertação.

6.1. Principais Conclusões

Através da análise cruzada da RSL e das entrevistas realizadas a profissionais do setor industrial, procurou-se compreender a transição digital das ferramentas de MC na indústria, quais os fatores que a influenciam, os impactos que dela decorrem e os desafios ainda por superar.

Relativamente à principal pergunta de investigação: ***“Como está a decorrer a transição digital das ferramentas de MC utilizadas na indústria?”*** e com base nos dados recolhidos, concluiu-se que esta transição está em curso, embora de forma assimétrica e condicionada por diversos fatores internos e externos às organizações. A digitalização das ferramentas de MC traduz-se não apenas na conversão tecnológica de instrumentos, mas sobretudo na adoção de novos paradigmas de recolha e análise de dados, na automação dos fluxos de melhoria e na integração de ferramentas tradicionais em ecossistemas digitais. No entanto, esta transição não é uniforme, variando significativamente consoante o setor de atividade, o grau de maturidade digital e a capacidade organizacional de mudança.

Para além disso, a informação recolhida permite responder às sub-perguntas: ***“Que ferramentas de MC estão a ser digitalizadas?”***

A RSL permitiu identificar um conjunto de tecnologias e ferramentas na Figura 23. A análise conjunta dos dois diagramas de Pareto evidencia uma clara concentração tanto ao nível das ferramentas de MC como das tecnologias digitais associadas à transição industrial. No que respeita às ferramentas de MC, observa-se que nove delas — nomeadamente *Kaizen*, *VSM*, *5S*, *JIT*, *Kanban*, *Poka Yoke*, *Standard Work*, *TPM* e *Heijunka* — representam, no seu conjunto, 78% da frequência total. Estas ferramentas, maioritariamente associadas à filosofia *Lean*, refletem uma aposta consolidada em práticas de eliminação de desperdícios, padronização e estabilidade operacional.

Por contraste, ferramentas com grande relevância conceptual, como o Diagrama de Pareto, SMED, *Takt Time* ou OEE, surgem com frequência residual, sugerindo uma menor digitalização ou menor destaque na literatura analisada.

No domínio das tecnologias digitais, três grandes grupos — Análise de Dados e AI, IIoT e Tecnologias de Manufatura Avançadas — concentram 68% das menções, refletindo a centralidade da recolha e interpretação de dados e da conectividade entre sistemas na transformação digital da indústria. No entanto, tecnologias críticas para a integração e segurança, como os Sistemas Integrados, as Tecnologias de Automação e Controlo e a cibersegurança industrial, apresentam presença significativamente menor. Este desequilíbrio evidencia a necessidade de alargar o foco da digitalização, integrando de forma mais robusta ferramentas e tecnologias menos recorrentes, mas fundamentais para a maturidade e sustentabilidade digital dos sistemas produtivos. As entrevistas corroboraram estes achados, com os profissionais a destacarem a crescente utilização de sensores, plataformas digitais e registos automáticos para suportar práticas *Lean* já implementadas.

Relativamente à sub-pergunta 2: ***“Quais os fatores críticos para uma implementação bem-sucedida da digitalização das ferramentas de MC?”***, os principais fatores são o envolvimento da liderança, a cultura de MC já enraizada, a capacitação dos colaboradores e o alinhamento estratégico das iniciativas digitais. Apesar de reconhecidos tanto na literatura como nas entrevistas, emergiram nas respostas aos entrevistados, a identificação de barreiras adicionais, nomeadamente a resistência à mudança, a escassez de competências digitais e as dificuldades técnicas na interoperabilidade entre sistemas, o que realça a importância da gestão da mudança neste processo.

Relativamente à sub-pergunta 3: ***“Que impactos têm sido observados com a digitalização das ferramentas de MC?”***, a literatura aponta para ganhos ao nível da eficiência operacional, rastreabilidade, agilidade na tomada de decisão e capacidade de antecipação. Já os profissionais entrevistados demonstraram perceções positivas, mas mais cautelosas. Os impactos observados foram sobretudo qualitativos e associados à melhoria na visualização dos processos, redução de erros humanos e maior envolvimento das equipas. Contudo, a ausência de instrumentos formais de avaliação desses impactos foi um ponto transversalmente referido.

Da comparação entre os resultados obtidos na RSL e nas entrevistas emergiram tanto convergências como divergências. Ambas reconhecem a relevância da digitalização para a evolução das práticas de MC e apontam os mesmos fatores críticos de sucesso. Contudo, a RSL tende a apresentar uma visão mais estruturada e idealizada, enquanto os profissionais entrevistados destacam as dificuldades e desafios reais enfrentados nas organizações, especialmente ao nível dos recursos humanos, limitações tecnológicas e resistência cultural.

A identificação de indicadores de maturidade digital associados à digitalização das ferramentas de MC foi estabelecida como um dos objetivos da presente investigação. Pretendia-se compreender se as organizações industriais adotam mecanismos formais de monitorização que permitam aferir o grau de progresso da sua transição digital no domínio específico da MC. Contudo, a análise desenvolvida no âmbito da RSL não permitiu atingir plenamente esse objetivo. Os estudos analisados abordam, com frequência, a incorporação de tecnologias digitais em práticas *Lean* e de MC, mas não apresentam quadros avaliativos consolidados nem indicadores sistemáticos que permitam medir o grau de maturidade digital das organizações nesse contexto. A ausência de referência a modelos de avaliação estruturados revela uma lacuna significativa na produção científica atual, dificultando a possibilidade de comparação entre contextos ou de monitorização da evolução digital ao longo do tempo.

No plano empírico, as entrevistas realizadas não revelaram a existência de metodologias formais de avaliação da maturidade digital nas organizações inquiridas. Ainda assim, os testemunhos recolhidos evidenciaram práticas que indiciam diferentes estágios de maturidade, como a utilização de *dashboards* digitais, a existência de plataformas integradas, a recolha automatizada de dados em tempo real e a crescente autonomia tecnológica dos operadores. Tais elementos, embora relevantes, são utilizados de forma empírica e não estruturada, não se traduzindo em sistemas formais de monitorização da maturidade digital.

Importa ainda salientar que, em substituição de indicadores de maturidade digital, as organizações tendem a utilizar predominantemente indicadores de desempenho operacional. Embora estes indicadores permitam aferir o impacto de determinadas iniciativas digitais, não avaliam de forma direta nem sistemática o nível de maturidade digital da organização no que respeita à digitalização das suas ferramentas e práticas de MC.

Neste sentido, conclui-se que, apesar da relevância do tema, a maturidade digital permanece não monitorizada de forma estruturada, quer na literatura, quer na realidade percecionada por profissionais da indústria, sendo substituída por métricas operacionais de natureza indireta. Esta constatação evidencia a necessidade de desenvolvimento de modelos específicos que permitam às organizações medir o seu grau de evolução digital, de modo a alinhar estrategicamente as suas práticas de MC com os objetivos de transformação digital sustentada.

6.2. Limitações da Investigação

Tal como em qualquer investigação, esta dissertação apresenta limitações que devem ser assumidas. A principal limitação da RSL prende-se com o foco exclusivo em documentos de acesso aberto, o que poderá ter condicionado o universo bibliográfico analisado. Para tentar evitar o viés da análise qualitativa das respostas às entrevistas, decidiu-se usar técnicas de NLP. Todavia, o número de entrevistas foi limitado, condicionando a abrangência para permitir generalizações.

Acresce ainda o facto de as entrevistas terem sido originalmente realizadas em português e posteriormente traduzidas para inglês com o intuito de ser possível realizar utilização da biblioteca VADER na *Sentimental analyses*. Este processo de tradução pode ter introduzido e/ou descartado subtilezas interpretativas ou perdas de significado que, inevitavelmente, constituem uma limitação adicional à fidelidade da interpretação dos dados recolhidos.

6.3. Contributo da Dissertação

A presente investigação oferece um contributo relevante tanto para a academia como para a prática industrial, ao abordar de forma sistemática e aprofundada a transição digital das ferramentas de MC no contexto da Indústria 4.0.

Do ponto de vista científico, esta dissertação enriquece o corpo teórico existente ao articular conceitos de MC contínua com tecnologias digitais, através da matriz de relações identificada. Com a aplicação de uma RSL, ancorada no método PRISMA, foi possível identificar tendências, lacunas e padrões de investigação que ainda não haviam sido explorados, sobretudo no que respeita à digitalização de práticas operacionais em setores industriais diversificados.

Adicionalmente, o cruzamento entre os resultados da RSL e a evidência empírica recolhida através das entrevistas estruturadas, enriquecida com a aplicação de técnicas de *Sentiment Analysis*, constitui um dos principais diferenciais desta dissertação, ao permitir uma triangulação entre perceções reais de profissionais que laboram nas PME da indústria portuguesa e as conclusões teóricas extraídas da literatura científica. Esta abordagem mista contribui para validar, contextualizar e, em certos casos, contrastar a informação teórica, revelando assim os desvios e alinhamentos entre a teoria e a prática.

Em termos práticos, este trabalho oferece às organizações industriais uma visão estruturada sobre o processo de digitalização das ferramentas de MC, destacando os principais facilitadores e barreiras. A sistematização das ferramentas *Lean* e tecnologias digitais mais frequentemente utilizadas, bem como a identificação dos seus impactos em áreas como a eficiência operacional (produtividade), a qualidade, a sustentabilidade e o fator humano, pode servir como guia para decisores industriais que pretendam iniciar ou acelerar processos de transição digital.

Além disso, a investigação sublinha a importância da gestão da mudança e da capacitação dos recursos humanos como fatores críticos para o sucesso da transformação digital, uma perspetiva que assume particular relevância num contexto em que a tecnologia tende a ser sobrevalorizada face ao capital humano.

Outro contributo distintivo prende-se com a reflexão crítica em torno da ausência de indicadores específicos de maturidade digital. Ao constatar que muitas organizações continuam a recorrer exclusivamente a métricas operacionais ou de desempenho tradicional, esta dissertação destaca a necessidade de desenvolver quadros de avaliação mais ajustados aos desafios da digitalização, o que abre caminho para investigações futuras centradas no desenvolvimento de modelos, taxonomias e métricas aplicáveis à realidade industrial nacional.

Por fim, o trabalho contribui para a consolidação de uma base conceptual e metodológica para sustentar novos estudos académicos sobre a digitalização da MC. A abordagem adotada, centrada numa análise rigorosa e contextualizada, reforça o posicionamento da MC como um campo dinâmico e em transformação, profundamente impactado pelas tecnologias digitais e pela evolução dos sistemas de produção.

Academicamente, importa ainda salientar que foram aplicadas diversas abordagens metodológicas que asseguraram o rigor do estudo. A nível teórico, recorreu-se RSL, estruturada segundo o método PRISMA, complementada por análise de conteúdo para codificação temática dos artigos. A análise bibliométrica foi realizada com o apoio do *software VOSviewer*, permitindo identificar relações entre conceitos através de mapas de coocorrência de palavras-chave. Foram conduzidas entrevistas estruturadas, cujas respostas foram analisadas com recurso à ferramenta de *Sentiment Analysis*, utilizando o modelo VADER, operacionalizado através do Orange. Este conjunto de ferramentas permitiu cruzar evidência científica e percepções industriais sobre a transição digital das ferramentas de MC, no contexto da Indústria 4.0.

Referências Bibliográficas

- Adnan, Q., Kaidi, H. M., Masrom, M., & Hamzah, H. S. (2023). IoT Implementation Framework to Support Industry 4.0 in the Malaysian Manufacturing Industries: A Systematic Review. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 14(1), 875–888. <https://doi.org/10.12785/ijcds/140168>
- Alkiayat, M. (2021). A Practical Guide to Creating a Pareto Chart as a Quality Improvement Tool. *Global Journal on Quality and Safety in Healthcare*, 4(2), 83–84. <https://doi.org/10.36401/jqsh-21-x1>
- Alsyouf, I., Al-Aomar, R., Al-Hamed, H., & Qiu, X. (2011). A framework for assessing the cost effectiveness of lean tools. *European Journal of Industrial Engineering*, 5(2), 170–197. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2011.039871>
- Ammirato, S., Felicetti, A. M., Linzalone, R., Corvello, V., & Kumar, S. (2023). Still our most important asset: A systematic review on human resource management in the midst of the fourth industrial revolution. *Journal of Innovation and Knowledge*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100403>
- Antony, J., McDermott, O., Powell, D. J., & Sony, M. (2021). Mapping the Terrain for Lean Six Sigma 4.0. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 610, 193–204. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92934-3_20
- Antony, J., McDermott, O., Powell, D., & Sony, M. (2023). The evolution and future of lean Six Sigma 4.0. *The TQM Journal*, 35(4), 1030–1047. <https://doi.org/10.1108/TQM-04-2022-0135>
- Antony, J., Sunder M. V., & Sony, M. (2022). A global study on the current practices and challenges of continuous improvement. *The TQM Journal*, 34(2), 259–280. <https://doi.org/doi.org/10.1108/TQM-12-2020-0293>
- Arcelay, I., Goti, A., Oyarbide-Zubillaga, A., Akyazi, T., Alberdi, E., & Garcia-Bringas, P. (2021). Definition of the future skills needs of job profiles in the renewable energy sector. *Energies*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/en14092609>
- Bajwa, A., Tonoy, A. A. R., Rana, S., & Ahmed, I. (2025). CYBERSECURITY IN INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW ON AI-BASED THREAT DETECTION FOR SCADA AND IOT NETWORKS. *ASRC Procedia: Global Perspectives in Science and Scholarship*, 01(01), 01–15. <https://doi.org/10.63125/1cr1kj17>

- Bandara, L. V., & Buics, L. (2024). Digital Twins in Sustainable Supply Chains: A Comprehensive Review of Current Applications and Enablers for Successful Adoption †. *Engineering Proceedings*, 79(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2024079064>
- Bellantuono, N., Nuzzi, A., Pontrandolfo, P., & Scozzi, B. (2021). Digital transformation models for the i4.0 transition: Lessons from the change management literature. *Sustainability (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132312941>
- Bengtsson, M. (2016). How to plan and perform a qualitative study using content analysis. *NursingPlus Open*, 2, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.npls.2016.01.001>
- Bernard, G., Budde, L., Hänggi, R., & Friedli, T. (2025). Driving Continuous Improvement with Industry 4.0 Technologies: Lessons from Multiple Use Case Analysis. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/app15042191>
- Bessant, J., & Caffyn, S. (1997). High-involvement innovation through continuous improvement. *International Journal of Technology Management*, 14(1), 7–28. <https://doi.org/10.1504/IJTM.1997.001705>
- Bessant, J., & Francis, D. (1999). Developing strategic continuous improvement capability. *International Journal of Operations and Production Management*, 19(11), 1106–1119. <https://doi.org/10.1108/01443579910291032>
- Bevan, B., Westwood, N., & Crowe, R. (2005). *Lean Six Sigma: Some basic concepts*.
- Butt, J. (2020). A strategic roadmap for the manufacturing industry to implement industry 4.0. *Designs*, 4(2), 1–31. <https://doi.org/10.3390/designs4020011>
- Carneiro, F., Suárez-Barraza, M. F., Silveira, T., Serôdio, M., & Antony, J. (2025). *Enhancing Higher Education Through Kaizen 4.0: Bridging Human and Artificial Intelligence Through Kaizen Methodologies* (pp. 110–122). https://doi.org/10.1007/978-3-031-84816-2_9
- Carvalho, A. M., Dias, A. R., Dias, A. M., & Sampaio, P. (2024). The Quality 4.0 Roadmap: Designing a capability roadmap toward quality management in Industry 4.0. *Quality Management Journal*, 31(2), 117–137. <https://doi.org/10.1080/10686967.2024.2317478>
- Casciani, D., & D'Itria, E. (2024). Fostering Directions for Digital Technology Adoption in Sustainable and Circular Fashion: Toward the Circular Fashion-Tech Lab. *Systems*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/systems12060190>
- Casimiro, P. (2024, February 8). *A Evolução da Transformação Digital nas Empresas Portuguesas: Um Olhar para o Futuro*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/evolu%C3%A7%C3%A3o-da-transforma%C3%A7%C3%A3o-digital-nas-empresas-um-olhar-ferreira-dywef/>

- Centobelli, P., Cerchione, R., Oropallo, E., Papa, A., & Palermo, S. (2025). Digital knowledge management in agile self-tuning organisations: a multiple case study. *Journal of Knowledge Management*, 29(1), 222–246. <https://doi.org/10.1108/JKM-04-2024-0460>
- Chen, C.K., Reyes, L., Dahlgaard, J., & Dahlgaard-Park, S. M. (2022). From quality control to TQM, service quality and service sciences: a 30-year review of TQM literature. *International Journal of Quality and Service Sciences*, 14(2), 217–237. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-09-2021-0128>
- Chen, X., Kurdve, M., Johansson, B., & Despeisse, M. (2023). Enabling the twin transitions: Digital technologies support environmental sustainability through lean principles. *Sustainable Production and Consumption*, 38, 13–27. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.020>
- Clausen, P., Mathiasen, J. B., & Nielsen, J. S. (2020). Smart Manufacturing Through Digital Shop Floor Management Boards. *Wireless Personal Communications*, 115(4), 3261–3274. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07379-y>
- Coleman, D. C., Mokyr, J., Mowery, D. C., & Rosenberg, N. (1991). The Lever of Riches: Technological Creativity and Economic Progress. *The Economic Journal*, 101(407), 996. <https://doi.org/10.2307/2233883>
- Costa, F., Alemsan, N., Bilancia, A., Tortorella, G. L., & Portioli Staudacher, A. (2024). Integrating industry 4.0 and lean manufacturing for a sustainable green transition: A comprehensive model. *Journal of Cleaner Production*, 465(May), 142728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142728>
- Cruz, G. (2024, March 28). *Diagrama de Ishikawa: o que é, para que serve e como usar*. Diagrama de Ishikawa: o que é, para que serve e como usar
- DeFranco, J. F., & Laplante, P. A. (2017). A content analysis process for qualitative software engineering research. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 13(2–3), 129–141. <https://doi.org/10.1007/s11334-017-0287-0>
- Deloitte. (2023). *Avaliação do potencial económico da transição digital em Portugal*. chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpegclefindmkaj/https://portugaldigital.gov.pt/wp-content/uploads/2023/05/Portugal-Digital_Avaliacao-Transicao-Digital_Documento-Final_v20230330_VF.pdf
- Deshpande, S. B., Tangod, K. K., Srinivasaiah, S. H., Alahmadi, A. A., Alwetaishi, M., Ong Michael, G. K., & Rajendran, S. (2025). Elevating educational insights: sentiment analysis of faculty feedback using advanced machine learning models. *Advances in Continuous and Discrete Models*, 2025(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13662-025-03933-9>

- Dillinger, F., Bernhard, O., & Reinhart, G. (2022). Competence Requirements in Manufacturing Companies in the Context of Lean 4.0. *Procedia CIRP*, 106(March), 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.155>
- Dinis-Carvalho, J., Sousa, R. M., Moniz, I., Macedo, H., & Lima, R. M. (2023). Improving the Performance of a SME in the Cutlery Sector Using Lean Thinking and Digital Transformation. *Sustainability (Switzerland)*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/su15108302>
- Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2021). Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: a conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(6), 1679–1698. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01783-2>
- Elsevier Inc. (2025, April 14). *What is peer review?* Peer Review Process Guidelines. <https://www.elsevier.com/reviewer/what-is-peer-review>
- Fakir, K., Ennawaoui, C., & El Mouden, M. (2023). Design of a six-layer data architecture based on OT/IT convergence in the context of Industry 4.0. *2023 3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology, IRASET 2023*. <https://doi.org/10.1109/IRASET57153.2023.10152971>
- Kunju, F. khan F., Naveed, N., Anwar, M. N., & Ul Haq, M. I. (2022). Production and maintenance in industries: impact of industry 4.0. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 49(3), 461–475. <https://doi.org/10.1108/IR-09-2021-0211>
- Ferreira, J. J., Lopes, J. M., Gomes, S., & Rammal, H. G. (2023). Industry 4.0 implementation: Environmental and social sustainability in manufacturing multinational enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136841>
- Fonseca, L., Leite, D., & Lima, V. (2014). Six sigma methodologies: Implementation and impacts on Portuguese small and medium companies (SMEs). *International Journal for Quality Research*, 8(4), 583–594.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Frecassetti, S., Rossini, M., & Portioli-Staudacher, A. (2024). Unleashing Industry 4.0: Leveraging Lean Practices to Overcome Implementation Barriers. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 10797–10814. <https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3396448>
- GEP. (2022). *Supply Chain: Digital Transformation Guide 2022*.

- Gupta, S. (2024). *An Edge-Computing based Industrial Gateway for Industry 4.0 using ARM TrustZone Technology*. <http://arxiv.org/abs/2410.02529>
- Hermann, M., Otto, B., & Pentek, T. *. (2015). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248>
- Hounshell, D. (1985). *From the American System to Mass Production, 1800-1932: The Development of Manufacturing Technology in the United States*. Johns Hopkins University Press.
- Hubbart, J. A. (2023). Organizational Change: The Challenge of Change Aversion. *Administrative Sciences*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/admsci13070162>
- Imai, M. (1986). *Kaizen, The Key to Japan'S Competitive Success PDF Scan to Download*.
- Indústria 4.0. (2021, April 28). IDEA, Lda. <https://site.ideia.cv/index.php/fr/blog-7/98-industria-4-0.html>
- INE. (2024). *Inquérito à utilização de tecnologias de informação e da comunicação pelas famílias*.
- Jidoka: Definition, Principles, and Examples in Lean Manufacturing. (2023, December 27). AZUMUTA. <https://www.azumuta.com/blog/jidoka-definition-principles-and-examples-in-lean-manufacturing/>
- Jing, S., Feng, Y., & Yan, J. (2021). Path selection of lean digitalization for traditional manufacturing industry under heterogeneous competitive position. *Computers & Industrial Engineering*, 161(August), 107631. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107631>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 April 2013 Securing the future of German manufacturing industry Final report of the Industrie 4.0 Working Group*.
- Kanabar, B., Piparva, K. G., Pandya, D., & Kanabar, R. B. (2024). The Impact and Challenges of the Implementation of 5S Methodology in Healthcare Settings: A Systematic Review. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.64634>
- Khattak, M. N., Zolin, R., & Muhammad, N. (2020). Linking transformational leadership and continuous improvement: The mediating role of trust. *Management Research Review*, 43(8), 931–950. <https://doi.org/10.1108/MRR-06-2019-0268>
- Kihel, Y. El. (2022). Digital Transition Methodology of a Warehouse in the Concept of Sustainable Development with an Industrial Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142215282>
- Kırmızı, M., & Kocaoglu, B. (2022). Digital transformation maturity model development framework based on design science: case studies in manufacturing industry. *Journal of*

- Manufacturing Technology Management*, 33(7), 1319–1346.
<https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2021-0476>
- Komkowsky, T., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Tortorella, G. L., & Pongboonchai-Empl, T. (2023). The integration of Industry 4.0 and Lean Management: a systematic review and constituting elements perspective. *Total Quality Management & Business Excellence*, 34(7–8), 1052–1069. <https://doi.org/10.1080/14783363.2022.2141107>
- Kralj, L. (2024, July 30). *Portugal: a snapshot of digital skills*. <https://digital-skills-jobs.europa.eu/en/latest/briefs/portugal-snapshot-digital-skills>
- Klaus. (2004). *Content analysis: an introduction to its methodology*. Sage.
- Kumer, I. M., Glasenapp, S., de Oliveira, M. O. R., & Junior, D. L. (2025). EXPLORING THE RELATIONSHIPS BETWEEN CORPORATE SOCIAL RESPONSIBILITY (CSR), BRAND EQUITY (BE), AND CORPORATE REPUTATION (CR): A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW. In *Revista Brasileira de Marketing* (Vol. 24, Issue 1, pp. 21–77). Universidade Nove de Julho-UNINOVE. <https://doi.org/10.5585/2025.26750>
- Lajeunesse, M. J. (2016). Facilitating systematic reviews, data extraction and meta-analysis with the metagear package for R. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(3), 323–330. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12472>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Leong, W. D., Teng, S. Y., How, B. S., Ngan, S. L., Rahman, A. A., Tan, C. P., Ponnambalam, S. G., & Lam, H. L. (2020). Enhancing the adaptability: Lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122870>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. de F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. In *International Journal of Production Research* (Vol. 55, Issue 12, pp. 3609–3629). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Liker, J. K. (2004). *The 14 principles of the Toyota way: An executive summary of the culture behind TPS*. <https://www.researchgate.net/publication/290007864>
- Lisy, K. (2015). Quality counts: reporting appraisal and risk of bias. In *JBIR database of systematic reviews and implementation reports* (Vol. 13, Issue 3, pp. 1–2). <https://doi.org/10.11124/jbisrir-2015-2267>

- Lucas, A., Filipe, D., Themudo, J., & Ribeiro, R. (2021, July 31). *A transição digital faz-se sobretudo de pessoas (que tanto descuramos)*. ECO. <https://eco.sapo.pt/opiniao/a-transicao-digital-faz-se-sobretudo-de-pessoas-que-tanto-descuramos/>
- Mallampati, M., Srivivivas, K., & Krishna. M, T. (2018). Design Process to Reduce Production Cycle Time in Product Development. *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*, 7(3), 125. <https://doi.org/10.11591/ijai.v7.i3.pp125-129>
- McKinsey Insights. (2024, August 7). *What is digital transformation?* McKinsey Digital.
- Método A3: O que é e quais suas principais características. (2020, October 21). Hominiss Solutions. <https://hominiss.com.br/metodo-a3-o-que-e-e-quais-suas-principais-caracteristicas/>
- Minetto, B. (2018, June 21). *O que é o ciclo DMAIC?* Qualiex Forlogic. <https://blogdaqualidade.com.br/o-que-e-dmaic/>
- Mofolasayo, A., Young, S., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). How to adapt lean practices in SMEs to support Industry 4.0 in manufacturing. *Procedia Computer Science*, 200, 934–943. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.291>
- Moosbrugger, N., Maurer, F., & Schumacher, J. (2022). *From Digitization to Digital Collaborative Service Designs: A Systematic Literature Review on the Categories, Concepts and Constructs of Industry 5.0*. 169–181. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14844-6_14
- Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/su10010247>
- Naciri, L., Mouhib, Z., Gallab, M., Nali, M., Abbou, R., & Kebe, A. (2022b). Lean and industry 4.0: A leading harmony. *Procedia Computer Science*, 200, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.238>
- Neuendorf, K. A., & Kumar, A. (2016). Content Analysis. In *The International Encyclopedia of Political Communication* (Issue January 2016, pp. 1–10). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118541555.wbiepc065>
- Nonato, L. (2023, June 19). *Kaizen: o que é, os 5 princípios e como aplicar na prática*. <https://blog.aevo.com.br/kaizen/>
- Oakland, J. S. (2014). *Total Quality Management and Operational Excellence*. www.routledge.com/cw/oakland

- Othman, U., & Yang, E. (2023). Human–Robot Collaborations in Smart Manufacturing Environments: Review and Outlook †. In *Sensors* (Vol. 23, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/s23125663>
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. In *Journal of Intelligent Manufacturing* (Vol. 31, Issue 1, pp. 127–182). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- Parlamento Europeu. (2021, April 22). *Moldar a transformação digital: a estratégia da UE explicada*. Parlamento Europeu . <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20210414STO02010/transformacao-digital-importancia-beneficios-e-politica-da-ue>
- Parlamento Europeu. (2023). *Moldar a transformação digital: a estratégia da UE explicada*. Transformação Digital: Importância, Benefícios e Política Da UE. <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20210414STO02010/transformacao-digital-importancia-beneficios-e-politica-da-ue>
- Parmar, M., Maturi, B., Dutt, J. M., & Phate, H. (2018). Sentiment Analysis on Interview Transcripts: An application of NLP for Quantitative Analysis. *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 1063–1068. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2018.8554498>
- Poka-Yoke – Lean Tool for improvement of Process Effectiveness and Efficiency*. (2020, September). Vaayath Consulting Services. <https://www.vaayath.com/poka-yoke-lean-tool/>
- Ruivo, P., Johansson, B., Sarker, S., & Oliveira, T. (2020). The relationship between ERP capabilities, use, and value. *Computers in Industry*, 117, 103209. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103209>
- Santos, J., Wysk, R. A., & Torres, J. M. (2006). *Improving Production with Lean Thinking* (3rd ed., Vol. 5).
- Sassanelli, C., Terzi, S., Panetto, H., & Doumeingts, G. (2021, June 21). Digital innovation hubs supporting SMEs digital transformation. *2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2021 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC52061.2021.9570273>
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). *Research Methods for Business Students* (8th Edition). Pearson. www.pearson.com/uk
- SENAI. (2019, March 19). *O que é Indústria 4.0?* <https://www.sesirs.org.br/industria-inteligente/industria-40-chegou-no-brasil>

- Sharma, A., & Bhattarai, P. C. (2022). Mixed Methods Research in Employability Discourse: A Systematic Literature Review Using PRISMA. *Education Research International*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/4848220>
- Silva, M. (2014, May 13). *Indicadores de desempenho de gestão de projetos e portfólio*. Project Management Knowledge Base. <https://pmkb.com.br/indicadores-de-desempenho-de-gestao-de-projetos-e-portfolio/>
- Silva, L. do C., & Silva, E. V. C. da. (2023, July). *Benefícios da implementação de um sistema de treinamento de ensino a distância para mecânicos de manutenção*. https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Os-8-pilares-do-TPM_fig1_372395499
- Silva, M., Alvelos, H., & Xambre, A. R. (2025). Quality Problems Reporting: Digitalization of the processes in an Automotive Company. *Procedia Computer Science*, 253, 737–744. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.135>
- Silvestri, L., Gallo, T., & Silvestri, C. (2022). Which tools are needed to implement Lean Production in an Industry 4.0 environment? A literature review. *Procedia Computer Science*, 200(2019), 1766–1777. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.377>
- Skrodelis, H., Kelle, R., & Romanovs, A. (2024). Cybersecurity in SCADA Systems with Advanced AI and ML Techniques. *ITMS - International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University*, 2024. <https://doi.org/10.1109/ITMS64072.2024.10741936>
- Smętkowska, M., & Mrugalska, B. (2018). Using Six Sigma DMAIC to Improve the Quality of the Production Process: A Case Study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 238, 590–596. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2018.04.039>
- Solheim, A. B., & Powell, D. J. (2020). A Learning Roadmap for Digital Lean Manufacturing. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 592 IFIP, 417–424. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57997-5_48
- Sony, M., Antony, J., & Douglas, J. A. (2020). Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: A narrative review of literature and future directions for research. In *TQM Journal* (Vol. 32, Issue 4, pp. 779–793). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/TQM-12-2019-0275>
- Sordan, J. E., Oprime, P. C., Pimenta, M. L., Silva, S. L. da, & González, M. O. A. (2022). Contact points between Lean Six Sigma and Industry 4.0: a systematic review and conceptual framework. In *International Journal of Quality and Reliability Management* (Vol. 39, Issue 9, pp. 2155–2183). Emerald Publishing. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-12-2020-0396>

- Spaltini, M., Acerbi, F., De Carolis, A., Terzi, S., & Taisch, M. (2024). Toward a technology roadmapping methodology to enhance sustainable and digital transition in manufacturing. *Production and Manufacturing Research*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2298572>
- Spurlock, D. G., Cox, L. R., Lewis, N. A., & Lueck, G. A. (2008). A content analysis of data collection and analysis techniques as reported in the engineering management literature. *EMJ - Engineering Management Journal*, 20(2), 46–55. <https://doi.org/10.1080/10429247.2008.11431766>
- Storm, J. M., Houmb, S. H., Kaliyar, P., Erdodi, L., & Hagen, J. M. (2024). Testing Commercial Intrusion Detection Systems for Industrial Control Systems in a Substation Hardware in the Loop Testlab. *Electronics (Switzerland)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/electronics13010060>
- Sweta, S. (2024). *Application of Sentiment Analysis in Diverse Domains* (pp. 19–46). https://doi.org/10.1007/978-981-97-2474-1_2
- Taylor, K. S., Mahtani, K. R., & Aronson, J. K. (2021). Summarising good practice guidelines for data extraction for systematic reviews and meta-analysis. *BMJ Evidence-Based Medicine*, 26(3), 88–90. <https://doi.org/10.1136/bmjebm-2020-111651>
- The Economist. (2019). Digitisation and its impact on supply chains. *The Economist*. <https://www.economist.com>
- Tinz, P., Tinz, J., & Zander, S. (2019). Knowledge management models for the smart factory: A comparative analysis of current approaches. *IC3K 2019 - Proceedings of the 11th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 3, 398–404. <https://doi.org/10.5220/0008348803980404>
- Tobon-Valencia, E., Lamouri, S., Pellerin, R., & Moeuf, A. (2022). Modeling of the Master Production Schedule for the Digital Transition of Manufacturing SMEs in the Context of Industry 4.0. *Sustainability (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/su141912562>
- Tortorella, G., Sawhney, R., Jurburg, D., de Paula, I. C., Tlapa, D., & Thurer, M. (2021). Towards the proposition of a Lean Automation framework: Integrating Industry 4.0 into Lean Production. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(3), 593–620. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2019-0032>
- TQM, Total Quality Management. (2019, June 11). BlogCatim. <https://blogcatim.blogspot.com/2019/06/tqm-total-quality-management.html>

- Varriale, V., Cammarano, A., Michelino, F., & Caputo, M. (2021). Sustainable Supply Chains with Blockchain, IoT and RFID: A Simulation on Order Management. *Sustainability*, 13(11), 6372. <https://doi.org/10.3390/su13116372>
- Vinodh, S., Antony, J., Agrawal, R., & Douglas, J. A. (2021). Integration of continuous improvement strategies with Industry 4.0: a systematic review and agenda for further research. In *TQM Journal* (Vol. 33, Issue 2, pp. 441–472). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/TQM-07-2020-0157>
- Vukelić, Ž., Cajner, H., & Barić, G. (2024). Research Model of the Degree of Technological Humanism in Manufacturing Companies in the Transformation towards Industry 5.0. *Tehnicki Glasnik*, 18(3), 410–417. <https://doi.org/10.31803/tg-20240502091110>
- Wamba, S., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G., & Gnanzou, D. (2015). How “big data” can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study. *International Journal of Production Economics*, 165, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.031>
- Weerabahu, W. M. S. K., Samaranayake, P., Nakandala, D., & Hurriyet, H. (2021). Enabling Factors of Digital Manufacturing Supply Chains: A Systematic Literature Review. *2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2021*, 118–123. <https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9672941>
- Zami, M. B. Al, Shaon, S., Quy, V. K., & Nguyen, D. C. (2024). *Digital Twin in Industries: A Comprehensive Survey*. <http://arxiv.org/abs/2412.00209>
- Zemskov, A. D., Fu, Y., Li, R., Wang, X., Karkaria, V., Tsai, Y.-K., Chen, W., Zhang, J., Gao, R., Cao, J., Loparo, K. A., & Li, P. (2024). *Security and Privacy of Digital Twins for Advanced Manufacturing: A Survey*. <http://arxiv.org/abs/2412.13939>
- Zhang, Q., Liu, C., Zhu, W., & Mei, S. (2024). Demystifying the Influencing Factors of Construction 4.0 Technology Implementation from a Sustainability Starting Point: Current Trends and Future Research Roadmap. *Buildings*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/buildings14020552>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- ZUP. (2020, October 3). *Ciclo PDCA do Kaizen*. <https://zup.com.br/blog/kaizen-como-aplicar-a-metodologia/>

Apêndice 1 – Tabela de Bibliografia Anotada da Pesquisa P1

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Setor Industrial	Departamento	Relevância
2024	P1_1	The HyDAPI framework: a versatile tool integrating Lean Six Sigma and digitalisation for improved quality management in Industry 4.0	Artigo Científico	RSL + Caso de Estudo	Indústria Generalizada	Qualidade	5
2023	P1_2	Digitalization and Adoption of Industry 4.0 in Engineer-to-order Small and Medium-sized Manufacturing Companies: An Empirical Analysis	Ata de Conferência	RL	Automóvel	Qualidade	1
2022	P1_3	Bin-Picking Solution for Randomly Placed Automotive Connectors Based on Machine Learning Techniques	Artigo Científico	RL	Automóvel	Produção	3
2021	P1_4	Local productive systems' transitions to industry 4.0+	Artigo Científico	RL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	5
2022	P1_5	Sustainability and Industry 4.0: Definition of a Set of Key Performance Indicators for Manufacturing Companies	Artigo de Revisão	RSL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	4
2021	P1_6	SCADA WebView: A State-of-the-Art Enterprise Transmission SCADA Engine	Artigo Científico	RL	Energético	Gestão de Operações	3
2023	P1_7	Digital Barriers in Digital Transition and Digital Transformation: Literature Review	Artigo Científico	RL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	5
2024	P1_8	Revealing the Supply Chain 4.0 Potential within the European Automotive Industry	Artigo Científico	Estudo de Caso	Automóvel	Logística	5
2024	P1_9	Digitalization in Family Business: Trajectories and Trends	Artigo Científico	RL	PME	Gestão de Operações	3
2024	P1_10	Shaping the Future of Cold Chain 4.0 Through the Lenses of Digital Transition and Sustainability	Artigo Científico	RL	Indústria Generalizada	Logística	3
2024	P1_11	Toward a technology roadmapping methodology to enhance sustainable and digital transition in manufacturing	Artigo de Jornal	RL + Caso de Estudo	Aeroespacial	Gestão de Operações	4
2025	P1_12	Generic Core and Soft Skills for Maritime Industry 4.0: A Conceptual Framework	-	-			-
2024	P1_13	A REVIEW OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ADDITIVE MANUFACTURING IN THE CONDITIONS OF DIGITAL AND GREEN TRANSITION	Artigo de Jornal	RL	Manufatura aditiva	Produção	1
2021	P1_14	Open educational resources for industry 4.0: Supporting the digital transition in an European dimension	Artigo Científico	RL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	5

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Sector Industrial	Departamento	Relevância
2022	P1_15	Towards a Smart Factory: An integrated approach based on Simulation and AHP	Ata de conferência	RL + Estudo de Caso	PME	Produção	5
2025	P1_16	Impact pathways: technology-aided supply chain planning for resilience	Artigo de Jornal	Estudo de Caso	Indústria Generalizada	Logística	1
2024	P1_17	The Quality 4.0 Roadmap: Designing a capability roadmap toward quality management in Industry 4.0	Artigo de Jornal	RL	Indústria Generalizada	Qualidade	4
2024	P1_18	Research Model of the Degree of Technological Humanism in Manufacturing Companies in the Transformation towards Industry 5.0	Artigo Científico	Investigação	Indústria Generalizada	Produção	5
2021	P1_19	Definition of the future skills needs of job profiles in the renewable energy sector	Artigo de Revista	RL	Energético	Recursos Humanos	3
2019	P1_20	The Role of a Digital Industry 4.0 in a Renewable Energy System	Artigo Científico	Estudo de caso	Energético	Gestão de Operações	1
2019	P1_21	User Evaluation of Industry 4.0 Concepts for Worker Engagement	-	-			-
2024	P1_22	Fostering Directions for Digital Technology Adoption in Sustainable and Circular Fashion: Toward the Circular Fashion-Tech Lab	Artigo Científico	RL	Moda	Gestão de Operações	3
2023	P1_23	Designing a Technological Pathway to Empower Vocational Education and Training in the Circular Wood and Furniture Sector through Extended Reality	Artigo Científico	Questionário	Mobiliário	Gestão de Operações	1
2024	P1_24	Linked data to streaming data sensors sources for direct access	Artigo Científico	RL	Indústria Generalizada	Logística	1
2024	P1_25	Demystifying the Influencing Factors of Construction 4.0 Technology Implementation from a Sustainability Starting Point: Current Trends and Future Research Roadmap	Artigo Científico	RL	Construção	Gestão de Operações	4
2022	P1_26	From Digitization to Digital Collaborative Service Designs: A Systematic Literature Review on the Categories, Concepts and Constructs of Industry 5.0	Artigo Científico	RSL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	5
2021	P1_27	Social Capital and Industry 4.0 Readiness in Developing Countries. Role of Potential and Realized Absorptive Capacity	Ata de Conferência	Investigação	Indústria Generalizada	Recursos Humanos	2

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Setor Industrial	Departamento	Relevância
2022	P1_28	Modeling of the Master Production Schedule for the Digital Transition of Manufacturing SMEs in the Context of Industry 4.0	Artigo Científico	Investigação	PME	Planeamento	5
2022	P1_29	Production and maintenance in industries: impact of industry 4.0	Artigo Científico	RL + Questioário	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	4
2023	P1_30	Industry 4.0 implementation: Environmental and social sustainability in manufacturing multinational enterprises	Artigo de Jornal	Investigação	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	5
2025	P1_31	Digital knowledge management in agile self-tuning organisations: a multiple case study	Artigo de Jornal	RL + Estudo de Caso	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	3
2021	P1_32	Digital transformation models for the i4.0 transition: Lessons from the change management literature	Artigo Científico	RSL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	3
2023	P1_33	IoT Implementation Framework to Support Industry 4.0 in the Malaysian Manufacturing Industries: A Systematic Review	Artigo de Jornal	RSL	Indústria Generalizada	Produção	4
2020	P1_34	Industry 4.0 strategic alignment framework: Multilevel perspective of digital transition in Indonesia	Ata de conferência	RL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	4
2021	P1_35	Digital innovation hubs supporting SMEs digital transformation	Artigo Científico	RL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	2
2023	P1_36	Still our most important asset: A systematic review on human resource management in the midst of the fourth industrial revolution	Artigo de Jornal	RSL	Indústria Generalizada	Recursos Humanos	4
2019	P1_37	Knowledge management models for the smart factory: A comparative analysis of current approaches	Ata de conferência	RL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	2
2023	P1_38	Construction Sector Transformation: Developing a New Learning Paradigm	-	-			-
2022	P1_39	Digital Transition Methodology of a Warehouse in the Concept of Sustainable Development with an Industrial Case Study	Artigo Científico	Caso de Estudo	Indústria Generalizada	Logística	4
2022	P1_40	Smart City and Industry 4.0: New Opportunities for Mobility Innovation	Artigo Científico	RL+ Caso de Estudo	Automóvel	Gestão de Operações	2
2023	P1_41	Enabling the twin transitions: Digital technologies support environmental sustainability through lean principles	Artigo Científico	RL	Indústria Generalizada	Produção	4

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Sector Industrial	Departamento	Relevância
2023	P1_42	Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review	Artigo de Revisão	Investigação	Naval	Gestão de Operações	1
2024	P1_43	Institutionalising Industry 4.0: a Delphi study of institutional change readiness for the fourth industrial revolution in an emerging economy	Artigo de Jornal	RL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	2
2024	P1_44	Industry 4.0 and sustainability: the case of the Italian textile district of Prato	Artigo Científico	RL + Estudo de Caso	Moda	Gestão de Operações	3
2022	P1_45	Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: What Are the Implications for Smart Logistics?	Artigo de Revisão	RL	Indústria Generalizada	Logística	4
2023	P1_46	Towards the Industry 4.0 agenda: Practitioners' reasons why a digital transition of shop floor management visualization boards is warranted	Artigo Científico	RL + Estudo de Caso	Indústria Generalizada	Produção	3
2022	P1_47	Does Industry 4.0 improve productivity? Evidence from the Italian automotive supply chain	Artigo de Jornal	RL	Automóvel	Logística	2
2021	P1_48	Industry 4.0-based dynamic Social Organizational Life Cycle Assessment to target the social circular economy in manufacturing	Artigo de Jornal	Caso de Estudo	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	1
2024	P1_49	The WISED knowledge-creating company: rethinking SECI model in light of the digital transition	Artigo de Investigação	RL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	2
2022	P1_50	Industry 4.0 transition: a systematic literature review combining the absorptive capacity theory and the data-information-knowledge hierarchy	Artigo de Investigação	RSL	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	2
2023	P1_51	Design of a six-layer data architecture based on OT/IT convergence in the context of Industry 4.0	Ata de Conferência	RL	Indústria Generalizada	Produção	2
2023	P1_52	Knowledge mapping of resilience and human rights in supply chains: A roadmapping taxonomy for twin green and digital transition design	Artigo de revista	RL	Indústria Generalizada	Logística	1
2024	P1_53	Public policies for Industry 4.0: some lessons from the Portuguese case	-	-			-
2024	P1_54	Easy Development of Industry 4.0 Remote Labs	Artigo Científico	Investigação	Indústria Generalizada	Recursos Humanos	3

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Setor Industrial	Departamento	Relevância
2023	P1_55	Neurophysiological UX Evaluation of Industry 4.0 Technologies: E-commerce, e-learning Websites, and VR Simulation	-	-			-
2023	P1_56	Industry 4.0 - Assessment of Digital Readiness of Manufacturing Companies in Portugal	Ata de conferência	Investigação	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	5
2024	P1_57	Digital transition from industry 4.0 to industry 5.0 in smart manufacturing: A framework for sustainable future	Artigo de Jornal	Investigação	Indústria Generalizada	Gestão de Operações	4
2023	P1_58	Industry 4.0 as an enabler of circular economy practices: Evidence from European SMEs	Artigo de Investigação	RL + Questioário	PME	Gestão de Operações	2
2024	P1_59	Technological and organisational factors to succeed in Industry 4.0 transition implementation: an empirical study	-	-			-

Apêndice 2 – Tabela de Bibliografia Anotada da Pesquisa P2

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Setor Industrial	Departamento	Relevância
2025	1	Digital transformation for business sustainability and growth in emerging markets	-	-	-	-	-
2025	2	Driving Continuous Improvement with Industry 4.0 Technologies: Lessons from Multiple Use Case Analysis	Artigo de Investigação	RL +Estudo de caso	Industria Generalizada	Gestão de Operações	4
2025	3	Quality costs and Industry 4.0: inspection strategy modelling and reviewing	Artigo de Investigação	Estudo de caso	Automóvel	Qualidade	3
2025	4	Lean Digitalization Solutions for SMEs in China	-	-	-	-	-
2025	5	Quality Problems Reporting: Digitalization of the processes in an Automotive Company	Artigo de conferência	Investigação-ação	Automóvel	Qualidade	4
2024	6	Lean Office Approach for Continuous Improvement Identification in the Admission Process of University Students	-	-	-	-	-
2024	7	Digital Twins in Sustainable Supply Chains: A Comprehensive Review of Current Applications and Enablers for Successful Adoption †	Artigo de conferência	RSL	Industria Generalizada	Logística	3
2024	8	University 4.0 essentials: Influence of industry 4.0 on higher education	Artigo científico	RL + Questionário	Educação Superior	N/A	1
2024	9	A Text Mining Procedure for Recognizing the Awareness of Industry 4.0 and Digitalization Perceptions in Construction Industry	-	-	-	-	-
2024	10	Improving Lean Engagement Through Utilising Improved Communication	-	-	-	-	-
2024	11	Unleashing Industry 4.0: Leveraging Lean Practices to Overcome Implementation Barriers	Artigo científico	RL	Industria Generalizada	Gestão de Operações	5
2023	12	Analysis of barriers for implementation of integrated Lean Six Sigma and Industry 4.0 using interpretive ranking process	-	-	-	-	-
2023	13	Improving the Performance of a SME in the Cutlery Sector Using Lean Thinking and Digital Transformation	artigo científico	investigação-ação + estudo de caso	cutelaria	Gestão de Operações	5
2023	14	Research on the construction of smart transportation system based on the double-difference digital twin technology test model	-	-	-	-	-

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Setor Industrial	Departamento	Relevância
2023	15	Progress and Trends in Industry 4.0 and Lean Six Sigma Integration	Capítulo de Livro	Revisão de Literatura	Industria Generalizada	Gestão de Operações	5
2023	16	8th IFIP WG 5.7 European Lean Educator Conference	-	-	-	-	-
2023	17	Lean and Industry 4.0: A bibliometric analysis	Artigo Científico	Revisão de Literatura	Industria Generalizada (PME)	Gestão de Operações	5
2022	18	Contact points between Lean Six Sigma and Industry 4.0: a systematic review and conceptual framework	Artigo Científico	Revisão Sistemática de Literatura	Industria Generalizada (PME)	Produção	5
2022	19	Digital transformation maturity model development framework based on design science: case studies in manufacturing industry	Artigo de investigação	Revisão Sistemática de Literatura	Industria Generalizada	Gestão de Operações	3
2022	20	Digitalisation and the performance measurement and management system: reinforcing empowerment	Artigo Científico	estudo de caso	Polimeros	RH	1
2022	21	Method for the Identification of Process Quality Characteristics and Suitable Measurement Systems in Battery Production	-	-	-	-	-
2022	22	The Internet of Things—an emerging paradigm to support the digitalization of future supply chains	-	-	-	-	-
2022	23	Digital Transformation of the Natural Stone Sector	-	-	-	-	-
2022	24	Lean 4.0: Digital Technologies as Strategies to Reduce Waste of Lean Manufacturing	-	-	-	-	-
2022	25	The Integration of Industry 4.0 in Operations Management: Toward Smart Lean Six Sigma	-	-	-	-	-
2022	26	Lean and industry 4.0: A leading harmony	artigo científico	revisão de literatura	Industria Generalizada	Gestão de Operações	5
2022	27	How to adapt lean practices in SMEs to support Industry 4.0 in manufacturing	artigo científico	revisão da literatura + estudo de caso	Industria Generalizada (PME)	Gestão de Operações	5
2022	28	Prioritization of Factors Affecting the Digitalization of Quality Management Using Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Best-Worst Method	-	-	-	-	-

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Setor Industrial	Departamento	Relevância
2021	29	Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: a conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption	artigo científico	revisão de literatura	Industria Generalizada (PME)	Gestão de Operações	3
2021	30	Towards the proposition of a Lean Automation framework: Integrating Industry 4.0 into Lean Production	Artigo de Investigação	RL+ Questionário	Industria Generalizada	Gestão de Operações	5
2021	31	Integration of continuous improvement strategies with Industry 4.0: a systematic review and agenda for further research	artigo científico	revisão sistemática da literatura	Industria Generalizada	Gestão de Operações	5
2021	32	Enabling Factors of Digital Manufacturing Supply Chains: A Systematic Literature Review	Artigo científico	revisão sistemática da literatura (SLR)	Industria Generalizada	Logística	3
2021	33	Mapping the Terrain for Lean Six Sigma 4.0	capítulo de livro	revisão sistemática da literatura	Industria Generalizada	Gestão de Operações	5
2021	34	Faktor mensch: potenzielle der digitalisierung mit lean management umsetzen; [Factor human]	-	-	-	-	-
2021	35	Continuous Improvement of Process Advisor Optimizing Furnace Model	-	-	-	-	-
2021	36	COVID-19 supply chain resilience modelling for the dairy industry	-	-	-	-	-
2020	37	Smart Manufacturing Through Digital Shop Floor Management Boards	Artigo científico	Questionário	Industria Generalizada	Gestão de Operações	4
2020	38	Dynamic criticality assessment as a supporting tool for knowledge retention to increase the efficiency and effectiveness of maintenance	-	-	-	-	-
2020	39	A strategy guidance model to realize industrial digitalization in production companies	-	-	-	-	-
2020	40	Development of a monitoring system for implementation of industrial digitalization and automation using 143 key performance indicators	-	-	-	-	-
2020	41	A Learning Roadmap for Digital Lean Manufacturing	capítulo de livro	revisão da literatura	Industria Generalizada	Produção	5
2020	42	6th European Lean Educator Conference	-	-	-	-	-
2020	43	Holistic productivity management using digitalization	-	-	-	-	-

Ano	Código	Título	Tipo Documento	Metodologia	Setor Industrial	Departamento	Relevância
2018	44	The Data-Driven Process Improvement Cycle: Using Digitalization for Continuous Improvement	Artigo de Investigação	revisão da literatura	Industria Generalizada	Produção	4

Apêndice 3 – Matriz de Tecnologias Digitais das Pesquisas P1 e P2

		P1_1	P1_3	P1_4	P1_5	P1_6	P1_7	P1_8	P1_9	P1_10
Ferramentas Digitalização										
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA								X	X
	PLC								X	X
	DCS								X	X
	Robótica colaborativa	X							X	X
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados	X	X			X				X
	Gateways IIoT para conectividade							X	X	X
	Plataformas de gerenciamento IIoT							X	X	X
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização	X								X
	Edge computing para processamento local de dados							X	X	
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem	X	X	X	X		X	X	X	X
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais	X	X	X	X	X		X	X	X
	Machine Learning para manutenção preditiva	X							X	X
	Digital Twins para simulação			X			X	X	X	X
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade								X	X
	Algoritmos de otimização para processos produtivos	X		X	X				X	X
Sistema integrados e interfaces	MES				X			X	X	X
	ERP		X	X	X			X	X	X
	PLM							X	X	X
	APIs industriais e protocolos de comunicação							X	X	X
	HMIs inteligentes								X	X
	Middleware para integração de sistemas legados								X	X
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão							X	X	
	Soluções de autenticação para ambientes OT								X	X
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais							X	X	X
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades									
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais							X	X	X
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)	X		X						
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento			X					X	X
	Realidade virtual para design e simulação	X		X					X	X
	AGV e drones									
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos	X					X	X	X	X

		P1_11	P1_14	P1_15	P1_17	P1_18	P1_19	P1_22
Ferramentas Digitalização								
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA							
	PLC							
	DCS							
	Robótica colaborativa	x		x		x	x	x
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados				x	x	x	x
	Gateways IIoT para conectividade	x						
	Plataformas de gerenciamento IIoT	x						
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização					x	x	x
	Edge computing para processamento local de dados							
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem		x		x	x	x	x
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais	x	x		x	x	x	x
	Machine Learning para manutenção preditiva	x				x	x	x
	Digital Twins para simulação	x		x	x	x	x	x
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade	x				x	x	x
	Algoritmos de otimização para processos produtivos						x	x
Sistema integrados e interfaces	MES	x				x	x	x
	ERP					x	x	x
	PLM	x						
	APIs industriais e protocolos de comunicação							
	HMIs inteligentes							
	Middleware para integração de sistemas legados							
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão							
	Soluções de autenticação para ambientes OT							
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais		x					
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades							
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais							
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)		x			x	x	x
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento	x				x	x	x
	Realidade virtual para design e simulação	x	x	x		x	x	x
	AGV e drones	x				x	x	x
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos							

		P1_25	P1_26	P1_27	P1_28	P1_29	P1_30	P1_31
Ferramentas Digitalização								
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA							
	PLC							
	DCS							
	Robótica colaborativa	x	x			x	x	x
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados	x	x		x	x	x	x
	Gateways IIoT para conectividade							
	Plataformas de gerenciamento IIoT							
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização	x						
	Edge computing para processamento local de dados					x	x	x
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem	x			x	x	x	x
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais	x		x	x	x	x	x
	Machine Learning para manutenção preditiva	x	x		x	x	x	x
	Digital Twins para simulação	x			x	x	x	x
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade	x						
	Algoritmos de otimização para processos produtivos	x			x	x	x	x
Sistema integrados e interfaces	MES	x					x	x
	ERP	x					x	x
	PLM							
	APIs industriais e protocolos de comunicação							
	HMIs inteligentes							
	Middleware para integração de sistemas legados							
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão							
	Soluções de autenticação para ambientes OT							
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais							
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades							
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais							
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)	x				x	x	x
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento	x	x			x	x	x
	Realidade virtual para design e simulação	x	x			x	x	x
	AGV e drones	x						
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos					x	x	x

		P1_32	P1_33	P1_34	P1_35	P1_36	P1_37	P1_39
Ferramentas Digitalização								
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA							
	PLC							
	DCS							
	Robótica colaborativa	x	x		x	x		x
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados	x	x	x	x	x	x	x
	Gateways IIoT para conectividade							
	Plataformas de gerenciamento IIoT							
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização				x	x		
	Edge computing para processamento local de dados	x	x					
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem	x	x	x	x	x	x	x
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais	x	x	x	x	x		x
	Machine Learning para manutenção preditiva	x	x		x	x	x	x
	Digital Twins para simulação	x	x		x	x		
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade					x		
	Algoritmos de otimização para processos produtivos	x	x		x	x		x
Sistema Integrados e interfaces	MES	x	x		x	x		x
	ERP	x	x		x	x		x
	PLM							
	APIs industriais e protocolos de comunicação							
	HMIs inteligentes							
	Middleware para integração de sistemas legados							
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão						x	
	Soluções de autenticação para ambientes OT						x	
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais							
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades							
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais							
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)	x	x		x	x		
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento	x	x	x	x	x	x	
	Realidade virtual para design e simulação	x	x		x	x		
	AGV e drones			x	x	x		
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos	x	x					

		P1_40	P1_41	P1_43	P1_44	P1_45	P1_46	P1_47
Ferramentas Digitalização								
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA							x
	PLC							x
	DCS							
	Robótica colaborativa			x	x		x	x
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados	x	x	x	x	x	x	x
	Gateways IIoT para conectividade							
	Plataformas de gerenciamento IIoT							
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização						x	x
	Edge computing para processamento local de dados							
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem	x	x	x	x	x	x	x
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais	x	x	x	x	x	x	x
	Machine Learning para manutenção preditiva			x	x		x	x
	Digital Twins para simulação						x	x
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade				x			
	Algoritmos de otimização para processos produtivos				x		x	x
Sistema integrados e interfaces	MES		x	x	x	x	x	x
	ERP			x	x	x	x	x
	PLM							
	APIs industriais e protocolos de comunicação							
	HMIs inteligentes		x	x		x		x
	Middleware para integração de sistemas legados							
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão							
	Soluções de autenticação para ambientes OT							
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais							
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades							
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais							
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)	x		x	x		x	x
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento			x	x			x
	Realidade virtual para design e simulação			x	x			x
	AGV e drones							x
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos							

		P1_49	P1_50	P1_51	P1_54	P1_56	P1_57	P1_58	P2_2
Ferramentas Digitalização									
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA	x	x	x			x	x	
	PLC	x	x	x			x	x	
	DCS	x		x				x	
	Robótica colaborativa	x	x		x		x	x	
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados	x	x	x	x		x	x	
	Gateways IIoT para conectividade	x		x				x	
	Plataformas de gerenciamento IIoT	x					x	x	
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização	x					x	x	x
	Edge computing para processamento local de dados	x					x	x	
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem	x	x	x	x	x	x	x	x
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais	x	x	x	x	x	x	x	x
	Machine Learning para manutenção preditiva	x	x	x	x		x	x	
	Digital Twins para simulação	x		x	x		x	x	x
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade	x					x	x	
	Algoritmos de otimização para processos produtivos	x			x		x	x	
Sistema integrados e interfaces	MES	x	x		x		x	x	x
	ERP	x	x	x	x		x	x	x
	PLM	x					x	x	x
	APIs industriais e protocolos de comunicação	x		x			x	x	
	HMIs inteligentes	x					x	x	x
	Middleware para integração de sistemas legados	x		x			x	x	
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão	x		x			x	x	
	Soluções de autenticação para ambientes OT	x		x			x	x	
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais	x		x			x	x	
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades	x					x	x	
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais	x				x	x	x	
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)	x	x		x		x	x	
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento	x		x	x		x	x	x
	Realidade virtual para design e simulação	x		x	x		x	x	
	AGV e drones	x					x	x	
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos	x			x		x	x	

		P2_3	P2_5	P2_7	P2_11	P2_13	P2_15	P2_17	P2_18
Ferramentas Digitalização									
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA								
	PLC								
	DCS								
	Robótica colaborativa			x					
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados			x					
	Gateways IIoT para conectividade								
	Plataformas de gerenciamento IIoT								
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização			x					
	Edge computing para processamento local de dados								
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem			x					
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais			x					
	Machine Learning para manutenção preditiva			x					
	Digital Twins para simulação			x					
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade			x					
	Algoritmos de otimização para processos produtivos			x					
Sistema Integrados e interfaces	MES								
	ERP			x					
	PLM								
	APIs industriais e protocolos de comunicação								
	HMIs inteligentes								
	Middleware para integração de sistemas legados								
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão								
	Soluções de autenticação para ambientes OT								
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais								
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades			x					
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais			x					
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)			x					
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento			x			x		
	Realidade virtual para design e simulação			x					
	AGV e drones			x					
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos			x					

		P2_19	P2_26	P2_27	P2_29	P2_30	P2_31	P2_32
Ferramentas Digitalização								
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA							
	PLC							
	DCS							
	Robótica colaborativa							
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados							x
	Gateways IIoT para conectividade							
	Plataformas de gerenciamento IIoT							
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização							
	Edge computing para processamento local de dados							x
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem							x
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais							
	Machine Learning para manutenção preditiva							
	Digital Twins para simulação							
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade							
	Algoritmos de otimização para processos produtivos							x
Sistema integrados e interfaces	MES							
	ERP							x
	PLM							
	APIs industriais e protocolos de comunicação							
	HMI's inteligentes							
	Middleware para integração de sistemas legados							
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão							x
	Soluções de autenticação para ambientes OT							
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais							
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades							
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais							
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)							x
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento							
	Realidade virtual para design e simulação							
	AGV e drones							
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos							x

		P2_33	P2_37	P2_41
Ferramentas Digitalização				
Tecnologias de Automação e Controle	Sistemas SCADA			
	PLC			
	DCS			
	Robótica colaborativa			
Data acquisition	Sensores inteligentes e atuadores conectados	x		
	Gateways IIoT para conectividade			
	Plataformas de gerenciamento IIoT			
	Sistemas de rastreamento RFID e tecnologias de localização			
	Edge computing para processamento local de dados			
	Cloud computing para armazenamento e processamento em nuvem	x		
Análise de Dados e AI	Big Data Analytics para processos industriais	x		
	Machine Learning para manutenção preditiva	x		
	Digital Twins para simulação	x		
	Sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade			
	Algoritmos de otimização para processos produtivos	x		
Sistema integrados e interfaces	MES			
	ERP			
	PLM			
	APIs industriais e protocolos de comunicação			
	HMIs inteligentes			
	Middleware para integração de sistemas legados			
Cibersegurança Industrial	Firewalls industriais e sistemas de detecção de intrusão			
	Soluções de autenticação para ambientes OT			
	Sistemas de monitoramento de segurança para redes industriais			
	Plataformas de gestão de vulnerabilidades			
	Soluções de backup e recuperação para ambientes industriais			
Tecnologias de manufatura avançada	Manufatura aditiva (impressão 3D)			
	Realidade aumentada para manutenção e treinamento			
	Realidade virtual para design e simulação			
	AGV e drones			
	Blockchain para rastreabilidade da cadeia de suprimentos			

Apêndice 4 – Matriz de Ferramentas de MC das Pesquisas P1 e P2

		P1_1	P1_3	P1_4	P1_5	P1_6	P1_7	P1_8	P1_9	P1_10	P1_11	P1_14	P1_15	P1_17	P1_18	P1_19	P1_22	P1_25	P1_26	P1_27	P1_28
Ferramentas MC																					
Ferramentas de padronização de operações	5S	x	x	x	x			x		x	x										
	Kaizen	x	x	x	x		x	x	x	x	x										
	Kanban	x	x	x	x			x		x	x										
	Just in Time	x	x	x	x					x	x										
	Gestão Visual						x		x												
	Standard Work	x	x	x	x		x	x		x	x										
	PDCA																				
Ferramentas de Diagnóstico de Problemas e Qualidade	5 Whys																				
	Diagrama de Ishikawa												x								
	Diagrama de Pareto																				
	A3																				
	TQM																				
	Six Sigma																				
	Poka Yoke	x	x	x	x			x		x	x										
	Jidoka																				
	Andon	x	x	x	x					x	x										
	CEP																				
Ferramentas de Análise e Fluxo de	DMAIC																				
	VSM	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x								
	SMED																				
	TPM	x	x	x	x					x	x										
Métricas e Análise de Desempenho	Heijunka	x	x	x	x					x	x										
	OEE																				
	Takt Time																				
	KPI						x	x	x												
	Kata de Melhoria																				

		P1_29	P1_30	P1_31	P1_32	P1_33	P1_34	P1_35	P1_36	P1_37	P1_39	P1_40	P1_41	P1_43	P1_44	P1_45	P1_46	P1_47	P1_49
Ferramentas MC																			
Ferramentas de padronização de operações	5S							X	X		X			X	X	X			
	Kaizen	X		X				X	X		X		X	X	X	X	X		
	Kanban			X				X	X		X			X	X	X			
	Just in Time							X	X		X			X	X	X			
	Gestão Visual																X		
	Standard Work							X	X		X			X	X	X			
	PDCA				X														
Ferramentas de Diagnóstico de Problemas e Qualidade	5 Whys				X														
	Diagrama de Ishikawa				X												X		
	Diagrama de Pareto																X		
	A3				X												X		
	TQM																		
	Six Sigma				X														
	Poka Yoke							X	X		X			X	X	X			
	Jidoka																		
	Andon							X	X		X			X					
	CEP																X		
	DMAIC																		
Ferramentas de Análise e Fluxo de	VSM				X			X	X		X			X	X	X			
	SMED																		
	TPM	X						X	X		X			X	X	X			
	Heijunka								X		X			X	X	X			
Métricas e Análise de Desempenho	OEE																		
	Takt Time																X		
	KPI																X		
	Kata de Melhoria																		

		P1_50	P1_51	P1_54	P1_56	P1_57	P1_58	P2_2	P2_3	P2_5	P2_7	P2_11	P2_13	P2_15	P2_17	P2_18	P2_19	P2_26	P2_27	P2_29
Ferramentas MC																				
Ferramentas de padronização de operações	5S							x				x	x	x	x	x		x	x	
	Kaizen							x				x	x	x	x	x		x	x	
	Kanban							x				x		x	x			x		
	Just in Time											x	x	x	x			x	x	
	Gestão Visual																			
	Standard Work									x	x		x						x	
	PDCA							x		x										
Ferramentas de Diagnóstico de Problemas e Qualidade	5 Whys																			
	Diagrama de Ishikawa													x		x				
	Diagrama de Pareto																			
	A3																			
	TQM									x						x				x
	Six Sigma													x	x					
	Poka Yoke							x				x		x		x		x	x	
	Jidoka							x												
	Andon							x												
	CEP															x				
	DMAIC															x		x		
Ferramentas de Análise e Fluxo de	VSM							x				x		x	x	x		x	x	
	SMED							x												
	TPM							x				x				x		x	x	
	Heijunka							x							x			x		
Métricas e Análise de Desempenho	OEE							x												
	Takt Time																			
	KPI							x					x				x			x
	Kata de Melhoria																			

		P2_30	P2_31	P2_32	P2_33	P2_37	P2_41
Ferramentas MC							
Ferramentas de padronização de operações	5S	X	X	-			
	Kaizen	X	X	-			X
	Kanban			-	X		
	Just in Time	X	X	-	X		
	Gestão Visual			-		X	
	Standard Work	X		-	X		
	PDCA			-			
Ferramentas de Diagnóstico de Problemas e Qualidade	5 Whys			-			
	Diagrama de Ishikawa			-			
	Diagrama de Pareto			-			
	A3			-			
	TQM		X	-			
	Six Sigma		X	-			
	Poka Yoke	X		-			
	Jidoka			-	X		
	Andon			-	X		
	CEP			-			
	DMAIC			-			
Ferramentas de Análise e Fluxo de	VSM	X	X	-			
	SMED			-			
	TPM		X	-	X		
	Heijunka	X		-			
Métricas e Análise de Desempenho	OEE			-			
	Takt Time			-			
	KPI			-			
	Kata de Melhoria			-			X

Apêndice 5 – Guião das Questões das Entrevistas

ID	Descrição
Q1	Como descreveria a forma como a sua empresa tem lidado com a transição digital? <i>Usar aspetos qualitativos na resposta, por exemplo, entusiasmo, frustração, confiança, receio, desconfiança, entre outros</i>
Q2	Como considera que a transição digital tem sido recebida pelo chão de fábrica? <i>Usar aspetos qualitativos na resposta, por exemplo, entusiasmo, frustração, confiança, receio, desconfiança, entre outros</i>
Q3	Quais as ferramentas de MC que têm sido mais aplicadas na adaptação digital da empresa?
Q4	Qual a perceção sobre a eficácia das ferramentas de MC no contexto atual de transformação digital? <i>Usar aspetos qualitativos na resposta, por exemplo, entusiasmo, frustração, confiança, receio, desconfiança, entre outros</i>
Q5	A introdução de ferramentas digitais tem melhorado ou dificultado os processos de MC?
Q6	PRODUTIVIDADE: Como tem impactado a digitalização das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> nos níveis de produtividade da empresa?
Q7	QUALIDADE: Considera que a integração digital das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> tem contribuído para a melhoria da qualidade dos processos e dos produtos? Como?
Q8	SUSTENTABILIDADE: Em que medida a digitalização da informação e das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> tem influenciado os esforços da empresa em termos de sustentabilidade ambiental ou energética?
Q9	FATOR HUMANO: Como descreveria o impacto da digitalização das ferramentas <i>Lean Manufacturing</i> no bem-estar e motivação dos colaboradores e quais os sentimentos que predominam?
Q10	Que indicadores são utilizados na sua organização para medir o sucesso da transição digital?

Apêndice 6 – Pontuação Classificativa do *Sentiment Analysis*

Sentiment Analysis da Questão Q1

ID	Description	Negative	Neutral	Positive	Compound
1	Still in a nascent state, but with confidence in the progress of the transition	0	0.574	0.426	0.8462
2	Enthusiasm	0	0	1	0.4404
3	Fear	1	0	0	-0.4939
4	Its implementation has been gradual in a consistent and thoughtful manner, trying to reduce paper use across all departments	0	0.867	0.133	0.3818
5	The transition in administrative services has been successful, but in production, it's much more difficult due to equipment costs and the required preparation for operation and maintenance	0.119	0.804	0.077	-0.3159
6	Confidence in implementing digital solutions in the factory, still at an initial implementation stage	0	0.706	0.294	0.6124
7	Slowly	0	1	0	0
8	Confidence, necessity	0	0.233	0.767	0.5106
9	With enthusiasm, but also with fear and some questions	0.325	0.528	0.147	-0.5187

Sentiment Analysis da Questão Q2

ID	Description	Negative	Neutral	Positive	Compound
1	Still in a nascent state, but with confidence in the progress of the transition	0	0.574	0.426	0.8462
2	Fear	1	0	0	-0.4939
3	Fear	1	0	0	-0.4939
4	On the shop floor, paper reduction through information digitization has been successfully and easily adopted by employees with IT skills	0	0.763	0.237	0.6808
5	That's the easiest part, I think... as long as it's well presented and explained and brings real, tangible benefits to simplify a task... because if it's not helpful, it will be immediately rejected	0.144	0.664	0.192	0.2187
6	Initial mistrust	0	1	0	0
7	Discomfort	1	0	0	-0.4215
8	Fear and some resistance to change	0.39	0.61	0	-0.4939
9	Fear and mistrust	0.615	0.385	0	-0.4939

Sentiment Analysis da Questão Q4

ID	Description	Negative	Neutral	Positive	Compound
1	In the context of digital transformation, there is still no awareness	0.18	0.82	0	-0.296
2	Confidence	0	0	1	0.5106
3	Confidence	0	0	1	0.5106
4	The tools have been positively successful for better and faster information consultation	0	0.471	0.529	0.8779
5	Digital transformation must come after investment in educational transformation and cultural paradigm change, where more attention is given to school preparation for better professional performance later	0	0.896	0.104	0.4404
6	Depending on people and workstations, there's initial fear due to perceived increased control and pressure, but also enthusiasm when they realize it makes tasks easier and safer, and highlights the value of their work	0.079	0.579	0.341	0.9217
7	Fast and efficient	0	0.417	0.583	0.4215
8	Perception that it's a necessity for the industry	0	1	0	0
9	Confidence	0	0	1	0.5106

Sentiment Analysis da Questão Q5

ID	Description	Negative	Neutral	Positive	Compound
1	Do not know	0	1	0	0
2	Improved, process automation	0	0.392	0.608	0.4767
3	Improved daily task planning	0	0.492	0.508	0.4767
4	Improved. Easier calculation and monitoring of KPIs	0	0.459	0.541	0.7096
5	Continuous improvement only exists if we improve our attitude toward learning, assimilating what we read and see online, and applying it to our personal and professional lives... if we can't do that, any improvement process is useless	0.063	0.738	0.199	0.7269
6	Improved, as it simplifies and automates implementation and monitoring	0	0.721	0.279	0.4767
7	Improved, allows access to information at your fingertips, one click away	0	0.763	0.237	0.4767
8	Great enabler for continuous improvement	0	0.297	0.703	0.7964
9	Improved	0	0	1	0.4767

Sentiment Analysis da Questão Q6, Q7, Q8, Q9

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q6	It is still too early to conclude as we are in the 'pen and paper' phase	Increased productivity, data monitoring, and result analysis	Positive	Facilitated control processes	Productivity increase is initially subjective and slowly becomes undeniable... when the difference is tangible, it's accepted without dispute	Enabled monitoring of indicators in Quality, Maintenance, and Production departments (OEE)	Allows daily and instant KPI tracking	Greater process clarity, more effective interaction between management and shop floor	Increased productivity
Q7	Lean Manufacturing tools are still being defined and adapted to the value chain, and thus not yet digitally integrated	Process analysis	Yes, through quality information	Yes, easier KPI consultation	Generally, I believe it always brings results, but for total acceptance by all, it needs careful explanation and rigorous implementation	Yes, the weld inspection system supports process quality	Yes. Greater process efficiency and reliable data recording	Yes, allows faster 'attack' and mitigation of quality issues	Yes, it avoids mistakes
Q8	Still in an incipient state, but with confidence in the progress of the transition	Energy savings, shorter transport times	Paper reduction	Paper reduction	Environmental and energy policies must go beyond nice political speeches. They must be internalized personally and publicly, and we must ensure our engagement isn't lost through negligent public practices	Initial mistrust and resistance, but enthusiasm from tech-savvy operators using tools like Teams, questionnaires, Dashboards	Reduction of consumables like paper, pens, print forms	Energy management system helps identify where energy can be saved; planning enables grouping and thus less water usage	Unknown
Q9	Still in a insipient state, but with confidence in the progress of the transition	Initial mistrust, curiosity during the process, and enthusiasm	Mistrust	Confidence and adaptation	Initial mistrust, enthusiasm when well presented, then... frustration when it's seen as useless or of little value	Mixed: mistrust from some, enthusiasm from tech-savvy users	Mistrust	Greater interaction with tech tools, more guidance	Confidence and enthusiasm

ID	Negative	Neutral	Positive
Q6	0	0.741	0.259
Q7	0.075	0.575	0.35
Q8	0.023	0.611	0.366
Q9	0.081	0.496	0.423