



**TECNOLOGIA
SETÚBAL**

ESCOLA SUPERIOR
POLITÉCNICO SETÚBAL

ALEXANDRE
GOMES
GONÇALVES

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA SOBRE TECNOLOGIA
BLOCKCHAIN - DESAFIOS E
OPORTUNIDADES NO CONTEXTO
DA INDÚSTRIA**

Relatório de Dissertação de Investigação
Mestrado em
Engenharia de Produção

ORIENTADOR

Professor Doutor Pedro Filipe do Carmo Cunha

COORIENTADOR

Professor Doutor Carlos Alberto do Rosário Silva
Fortes

dezembro 2025

ALEXANDRE
GOMES
GONÇALVES

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA SOBRE TECNOLOGIA
BLOCKCHAIN - DESAFIOS E
OPORTUNIDADES NO CONTEXTO
DA INDÚSTRIA**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor Ricardo António
Lamberto Duarte Cláudio, ESTSetúbal/IPS

Orientador: Professor Doutor Pedro Filipe do Carmo
Cunha, ESTSetúbal/IPS

Arguente: Professor Doutor José Dias Pereira,
ESTSetúbal/IPS

dezembro 2025

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha profunda gratidão aos meus orientadores, Professores Pedro Cunha e Professor Carlos Fortes. A orientação e o apoio fornecidos foram fundamentais para a realização deste trabalho acadêmico.

Gostaria de expressar o meu mais profundo agradecimento ao Professor Pedro Cunha, cuja dedicação excedeu todas as expectativas. As múltiplas reuniões realizadas, o seu extraordinário apoio e a motivação constante que me proporcionou foram fundamentais, sempre a incentivar e a fazer com que eu progredisse da melhor forma possível.

No âmbito pessoal, é imperativo expressar a mais profunda gratidão à minha família, cujo apoio e incentivo contínuos foram fundamentais para o alcance dos objetivos delineados.

A todos os colegas e amigos que estiveram presentes e que, de forma individual e distinta, contribuíram com o seu apoio, tornando esta experiência académica mais simples e significativa.

Resumo

No atual contexto de transformação digital, as empresas enfrentam crescente pressão para melhorar a rastreabilidade, transparência e eficiência. Este trabalho analisou o impacto da tecnologia blockchain na indústria, avaliando o seu potencial para reforçar a confiança, automatizar processos e promover sustentabilidade. A revisão sistemática realizada permitiu identificar aplicações, benefícios e limitações. Concluindo que a blockchain melhora a rastreabilidade, reduz fraudes, aumenta a segurança da informação e apoia a automação, embora enfrente desafios como custos, falta de normalização e integração. Ainda assim, demonstra ser uma tecnologia promissora para reforçar a eficiência e resiliência industrial.

Palavras-chave: *Blockchain*, Cadeia de abastecimento, Aplicações Industriais, Rastreabilidade, Produção inteligente, Industria 4.0

Abstract

In the current context of digital transformation, companies face increasing pressure to improve traceability, transparency, and efficiency. This study analysed the impact of blockchain technology on industry, assessing its potential to strengthen trust, automate processes, and promote sustainability. The systematic review carried out identified applications, benefits, and limitations. It concluded that blockchain improves traceability, reduces fraud, increases information security and supports automation, although it faces challenges such as costs, lack of standardisation and integration. However, it proves to be a promising technology for enhancing industrial efficiency and resilience.

Keywords: *Blockchain, Supply chain, Industrial applications, Traceability, Smart manufacturing, 4.0 Industry*

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice.....	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Siglas e Acrónimos	xi
Capítulo 1 Introdução	1
1.1. Introdução.....	2
1.2. Âmbito e objetivos do estudo.....	3
1.3. Metodologia utilizada	5
1.4. Estrutura do documento	6
Capítulo 2 Metodologia de estudo.....	9
2.1. Descrição da revisão sistemática de literatura.....	10
2.2. Abordagem metodológica adotada	11
2.3. Protocolo utilizado	11
2.4. Questões de pesquisa	13
2.5. Critérios de elegibilidade	14
2.6. Bases de dados e termos de investigação selecionados	15
2.7. Estratégias de busca e análise.....	16
Capítulo 3 Enquadramento do trabalho.....	20
3.1. Introdução e critérios de seleção do estado da arte	21
3.2. Indústria 4.0.....	21
3.3. <i>Internet of things</i>	27

Capítulo 4	Resultados da Revisão Sistemática da literatura	31
4.1.	<i>Blockchain</i>	32
4.1.1.	<i>Tipos de sistemas</i>	32
4.1.2.	<i>Definição de blockchain</i>	34
4.1.3.	<i>Tipos de blockchain</i>	35
4.1.4.	<i>Implementação da blockchain na cadeia de abastecimento</i>	38
4.1.5.	<i>Fundamentos da blockchain</i>	42
4.2.	<i>Aplicações industriais da blockchain</i>	45
4.2.1.	<i>Blockchain na cadeia de abastecimento</i>	45
4.2.2.	<i>Blockchain na logística e transporte marítimo</i>	49
4.2.3.	<i>Blockchain na cadeia alimentar: confiança, rastreabilidade e economia circular</i>	51
4.2.4.	<i>Indústria têxtil: rastreabilidade ética e sustentabilidade social</i>	53
4.2.5.	<i>Retalho e mobiliário</i>	54
4.2.6.	<i>Perspetivas internacionais: maturidade em contraste com a dependência institucional</i>	56
4.2.7.	<i>Análise e comparação dos diferentes artigos e casos de estudo</i>	58
4.2.8.	<i>Blockchain, sustentabilidade e economia circular</i>	60
4.2.9.	<i>Blockchain no setor energético - Descentralização e novos modelos de negócio</i>	62
4.2.10.	<i>Blockchain na impressão 3D e cadeias de abastecimento digitais</i> ... 66	
4.2.11.	<i>Blockchain no setor do petróleo e gás</i>	67
4.2.12.	<i>Considerações finais</i>	70
Capítulo 5	Síntese e análise do trabalho desenvolvido	73
5.1.	Síntese do trabalho desenvolvido	74
5.2.	Principais ensinamentos	74
5.2.1.	<i>Contributos teóricos e conceptuais</i>	74

5.2.2. <i>Impactos observados na literatura</i>	75
5.3. Limitações do estudo	80
Capítulo 6 Conclusões e Desenvolvimento Futuro	82
6.1. Conclusões	83
6.2. Desenvolvimentos futuros	84

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Percentagem de artigos utilizados publicados por ano	18
Figura 2.2 - Protocolo <i>PRISMA</i>	19
Figura 3.1 - Revolução industrial ao longo do tempo.....	22
Figura 3.2 - Integração Vertical.....	25
Figura 3.3 Integração horizontal	26
Figura 3.4 - <i>Internet of things</i>	28
Figura 3.5 Tecnologias emergentes indústria 4.0	29
Figura 4.1 - Sistema ERP	32
Figura 4.2 - Tipos de sistemas.....	33
Figura 4.3 - Estrutura de uma cadeia de abastecimento	39
Figura 4.4 - Transformação da cadeia de abastecimento.....	41

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Critérios de Inclusão e exclusão	15
Tabela 2.2 - Sintaxes utilizadas nas bases de dados	16
Tabela 2.3 - Fontes utilizadas.....	17
Tabela 4.1 - Comparação entre os vários tipos de <i>blockchain</i>	37
Tabela 4.2 - Questões e respostas da Revisão Sistemática.	46
Tabela 5.1 - Resultados e Impactos Identificados na RSL.....	77
Tabela 5.2 – Perguntas e respostas	79

Lista de Siglas e Acrónimos

<i>3D</i>	<i>Three-Dimensional</i> (Tridimensional)
<i>AM</i>	<i>Additive Manufacturing</i> (Fabrico Aditivo)
<i>CPS</i>	<i>Cyber-Physical Systems</i> (Sistemas Ciberfísicos)
<i>CPPS</i>	<i>Cyber-Physical Production Systems</i> (Sistemas Ciberfísicos de Produção)
<i>DAO</i>	<i>Decentralized Autonomous Organizations</i> (Organizações Autónomas Descentralizadas)
<i>DPoS</i>	<i>Delegated Proof of Stake</i> (Prova de Participação Delegada)
<i>ERP</i>	<i>Enterprise Resource Planning</i> (Planeamento dos Recursos Empresariais)
<i>IA</i>	Inteligência Artificial
<i>IBM</i>	<i>International Business Machines</i> (Corporação Internacional de Máquinas de Negócios)
<i>IIoT</i>	<i>Industrial Internet of Things</i> (Internet Industrial das Coisas)
<i>IoT</i>	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
<i>IP</i>	<i>Intellectual Property</i> (Propriedade Intelectual)
<i>i4.0</i>	<i>Industry 4.0</i> (Indústria 4.0)
<i>JBI</i>	<i>Joanna Briggs Institute</i>
<i>MES</i>	<i>Manufacturing Execution System</i> (Sistema de Controlo de Produção)
<i>P2P</i>	<i>Peer-to-Peer</i> (Ponto a Ponto)

PME	Pequenas e Médias Empresas
<i>PoA</i>	<i>Proof of Authority</i> (Prova de Autoridade)
<i>PoS</i>	<i>Proof of Stake</i> (Prova de Participação)
<i>PoW</i>	<i>Proof of Work</i> (Prova de Trabalho)
<i>PRISMA</i>	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
PROSPERO	<i>Prospective Register of Systematic Reviews</i>
<i>RSL</i>	Revisão Sistemática da Literatura
<i>SAMPL</i>	<i>Secure Additive Manufacturing Platform</i> (Plataforma segura de fabrico aditivo)
TLE	Through-Life Engineering (Engenharia ao Longo do Ciclo de Vida)
<i>V2G</i>	<i>Vehicle-to-Grid</i> (Veículo para rede)
<i>VUCA</i>	<i>Volatility, Uncertainty, Complexity and Ambiguity</i> (Volatilidade, Incerteza, Complexidade e Ambiguidade)

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo introduz o enquadramento geral do estudo, salientando a relevância da tecnologia blockchain no contexto da transformação digital e da Indústria 4.0. São apresentadas as motivações para o tema e os desafios enfrentados pela indústria na adoção de tecnologias emergentes. O capítulo em questão estabelece os objetivos gerais e específicos da dissertação, bem como o contributo esperado para o domínio industrial. A metodologia de investigação, assente numa Revisão Sistemática da Literatura (RSL) segundo o protocolo PRISMA, é descrita, garantindo rigor e transparência na análise. Por fim, é apresentada a estrutura global do documento, clarificando a lógica e sequência dos capítulos que compõem o trabalho.

1.1. Introdução

A implementação da tecnologia *blockchain* na indústria tem vindo a assumir um papel cada vez mais relevante, à medida que as exigências por maior transparência, segurança e eficiência nos processos produtivos e logísticos se intensificam. A natureza descentralizada e imutável da tecnologia *blockchain* permite o registo fiável de transações e acontecimentos, assegurando a integridade dos dados ao longo de toda a cadeia de valor. Esta característica é particularmente valiosa em contextos industriais onde a rastreabilidade e a conformidade normativa são críticas.

Um dos contributos mais significativos da *blockchain* reside na sua capacidade de reforçar a rastreabilidade dos produtos. Através do registo sequencial e permanente de cada etapa de produção, transporte e entrega, é possível obter um histórico completo e transparente, acessível a todos os intervenientes autorizados. Tal funcionalidade tem especial importância na prevenção de fraudes, no combate à falsificação de produtos e na promoção de práticas éticas e sustentáveis, sendo essencial, por exemplo, para assegurar a providência de matérias-primas ou o cumprimento de normas sanitárias e ambientais.

Adicionalmente, a utilização de contratos inteligentes (*Smart Contracts*) permite a automatização de processos industriais, reduzindo a intervenção humana, os erros operacionais e os custos associados. Estes contratos digitais autoexecutáveis possibilitam a formalização de acordos entre partes, cuja execução é desencadeada automaticamente mediante o cumprimento de determinadas condições pré-estabelecidas. Este mecanismo revela-se particularmente útil em contextos de gestão de cadeias de abastecimento, controlo de qualidade e pagamentos automáticos, conferindo maior eficiência e confiança às operações industriais.

A *blockchain* também contribui significativamente para a segurança da informação, uma vez que descentraliza o armazenamento de dados, dificultando ataques cibernéticos e adulterações. Esta segurança reforçada é determinante em sectores altamente competitivos, onde a proteção de dados sensíveis e propriedade intelectual representa uma vantagem estratégica. Além disso, o registo distribuído da *blockchain* pode ser utilizado como instrumento de auditoria, facilitando o

cumprimento de exigências legais e regulatórias, ao mesmo tempo que promove práticas empresariais mais responsáveis e transparentes.

Importa ainda referir a aplicabilidade desta tecnologia no contexto da sustentabilidade industrial. Ao permitir o registo fiável de indicadores ambientais, como emissões de carbono ou consumo energético, a *blockchain* pode apoiar os esforços das organizações com o objetivo de alcançarem metas de sustentabilidade e de demonstrarem conformidade com padrões internacionais.

O surgimento deste tema centrado na análise da aplicação da tecnologia *blockchain* na indústria revela-se de elevada pertinência relativamente à atualidade que se vive nas empresas. A transformação digital e a crescente complexidade das cadeias de valor industriais exigem abordagens inovadoras e resilientes, capazes de responder aos desafios de um mercado globalizado e em constante mudança.

1.2. Âmbito e objetivos do estudo

A presente dissertação tem como finalidade principal apresentar a investigação realizada com vista de explorar o papel da tecnologia *blockchain* no contexto industrial, analisando de forma sistemática a sua aplicabilidade, potencial de transformação e impacto nas operações industriais. A investigação pretendeu contribuir para um melhor entendimento da forma como esta tecnologia emergente pode ser integrada em ambientes produtivos, nomeadamente em áreas como a rastreabilidade, a automatização de processos, a transparência de dados e a otimização da cadeia de abastecimento.

De forma mais específica, este trabalho propôs-se atingir os seguintes objetivos:

- Compreender o conceito de tecnologia *blockchain* no contexto industrial, incluindo os seus fundamentos técnicos, as suas variantes (pública, privada, consórcio e híbrida) e os seus princípios de funcionamento em ambientes produtivos;
- Analisar o nível de maturidade e de adoção da tecnologia *blockchain* na indústria, identificando sectores mais avançados na sua implementação, bem como barreiras à sua implementação;

- Identificar os principais desafios e oportunidades associados à aplicação da *blockchain* na indústria, tendo em consideração aspetos como a complexidade dos sistemas, a integração tecnológica, a cibersegurança, a interoperabilidade e os custos de implementação;
- Avaliar o impacto da *blockchain* em áreas-chave da gestão industrial;
- Investigar as metodologias, ferramentas e plataformas tecnológicas mais frequentemente utilizadas na implementação de soluções baseadas em *blockchain*, com destaque para a integração com outras tecnologias emergentes, como a *Internet of Things (IoT)* e os Sistemas Ciberfísicos (*CPS*);
- Identificar quais os desafios e oportunidades que a mesma irá criar em termos de melhoria da eficiência e eficácia do fluxo de trabalho (*workflow*) em empresas industriais.

Para se alcançar estes objetivos, foi necessário estudar todo o ambiente industrial e os processos que cada indústria utiliza, devido ao elevado número de ramos e tipos de indústria, de modo a criar mecanismos para se lidar com a variabilidade e complexidade que estes mesmos apresentam de modo a implementar a tecnologia *blockchain* de forma mais eficiente e eficaz possível.

A implementação desta nova tecnologia nas empresas surgiu devido a atualmente cada vez mais as empresas enfrentam uma série de desafios significativos, sendo um deles a transformação digital que obriga a muitas empresas evoluir para acompanhar a rápida evolução tecnológica e implementar novas ferramentas.

A globalização é outro dos grandes problemas que as empresas atualmente enfrentam, pois cria uma complexidade enorme na gestão das cadeias de suprimentos, aumentando a vulnerabilidade a paragens e exigindo maior eficiência, pois os seus concorrentes a nível global também procuram esta melhoria a nível de qualidade e exigência que o cliente coloca nas empresas. Todos estes problemas fazem com que as empresas procurem adaptar-se e a serem mais flexíveis para satisfazer as mudanças contínuas e muitas vezes inesperadas das necessidades dos clientes. Estas situações fazem com que novas tecnologias como a *blockchain*, que inicialmente não foram projetadas para a indústria, comecem a ser utilizadas por

meio de adaptações e mecanismos de implementação para resolver desafios e problemas.

Em síntese, a base da presente investigação, conforme descrito anteriormente, teve como objetivo compreender e avaliar as oportunidades na indústria:

- Desenvolver e adotar novas tecnologias para acompanhar a complexidade e flexibilidade exigida atualmente;
- Melhorar a rastreabilidade dos produtos durante toda a sua produção e uma melhor gestão da cadeia de abastecimento devido ao contexto de globalização em que as empresas atuam;
- Incrementar a capacidade de cumprir prazos de entrega e assegurar um nível de qualidade do produto final maior;
- Ser mais resiliente e capaz de fazer face à crescente competitividade entre empresas decorrente da globalização;
- Reduzir os desafios e problemas do mercado atual, permitindo uma gestão mais eficaz da flexibilidade e da complexidade enfrentadas pelas empresas.

Estes objetivos foram concretizados através de uma revisão da literatura, orientada por um protocolo metodológico bem definido, permitindo uma análise estruturada, transparente e crítica do conhecimento existente sobre a aplicação da tecnologia *blockchain* no setor industrial.

1.3. Metodologia utilizada

A investigação desenvolvida nesta dissertação baseou-se numa Revisão Sistemática da Literatura (RSL), de natureza qualitativa e exploratória, orientada para a compreensão das aplicações da tecnologia *blockchain* na indústria. Esta abordagem foi escolhida por permitir reunir e analisar de forma estruturada o conhecimento científico existente sobre o tema, identificando tendências, falhas e oportunidades de aplicação relevantes para o contexto da Engenharia.

A metodologia seguiu um processo organizado em três etapas. Na primeira, foi realizada a pesquisa e seleção de estudos nas bases de dados *Scopus* e *ScienceDirect*, recorrendo a palavras-chave relacionadas com *blockchain*, *supply chain*, *industrial applications*, *traceability* e *smart manufacturing*. Na segunda,

procedeu-se à análise e categorização dos artigos, considerando os seus objetivos, métodos, resultados e contributos teóricos. Por fim, na terceira etapa, efetuou-se uma síntese crítica comparativa, procurando compreender de que modo as diferentes abordagens evidenciam o impacto da *blockchain* na eficiência, rastreabilidade e sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A escolha por uma metodologia qualitativa e descritiva justifica-se pela natureza emergente do tema, que exige uma compreensão aprofundada dos mecanismos de adoção tecnológica e transformação organizacional. Assim, mais do que recolher dados empíricos, esta dissertação procura integrar e interpretar o conhecimento existente, criando uma visão coerente sobre o papel da *blockchain* no contexto da Indústria.

Esta metodologia permitiu construir a base conceptual que sustenta os capítulos seguintes, onde são apresentados os fundamentos técnicos da *blockchain* e a análise das suas aplicações em diferentes setores industriais.

1.4. Estrutura do documento

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos principais, cuja organização segue a lógica definida pelo protocolo da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) adotado. Deste modo, a sequência dos capítulos reflete as etapas essenciais do processo de investigação. Começa pelo enquadramento do tema e formulação do problema, avança para a descrição da metodologia sistemática utilizada, prossegue com a análise da literatura e dos estudos de caso selecionados e culmina com a apresentação das conclusões e propostas de investigação futura.

Esta abordagem garante rigor, transparência e consistência entre o método seguido e a estrutura global do trabalho.

O **Capítulo 1 – Introdução**, estabelece o enquadramento geral da investigação, apresentando o contexto em que o tema da *blockchain* se insere e a sua pertinência para a área da engenharia de produção. Neste capítulo definem-se ainda o problema de investigação, os objetivos do trabalho e as questões de investigação que lhe estão associadas. São igualmente explicitadas as motivações que justificam a relevância científica e prática do estudo.

O **Capítulo 2 – Metodologia de estudo**, descreve em detalhe a abordagem metodológica adotada. É dada particular atenção à Revisão Sistemática da Literatura, explicando-se os protocolos de referência existentes e justificando-se a escolha do protocolo PRISMA como guia para a investigação. São também explicitados os critérios de inclusão e exclusão utilizados na seleção dos artigos, o processo de recolha e análise da literatura, bem como as principais decisões metodológicas que moldaram o desenvolvimento do trabalho.

O **Capítulo 3 – Enquadramento do trabalho** apresenta o estado da arte relativo à aplicação da tecnologia blockchain no contexto da Indústria 4.0, com base na revisão sistemática da literatura realizada segundo o protocolo PRISMA. São identificadas as principais áreas industriais de aplicação, os benefícios e barreiras associados, bem como as lacunas que justificam novas investigações. Este capítulo desenvolve ainda uma análise aprofundada sobre os conceitos e tecnologias que sustentam a Indústria 4.0, com destaque para a *Internet of Things (IoT)*, os Sistemas Ciberfísicos (*CPS*) e a Integração Vertical e Horizontal dos processos produtivos. É explorada a forma como a integração da blockchain com estas tecnologias proporciona a criação de *Smart Factories* e aumenta a eficiência, segurança e sustentabilidade das operações industriais.

O **Capítulo 4 – Apresentação e Análise de Resultados** apresenta os resultados obtidos na Revisão Sistemática da Literatura, detalhando os artigos selecionados, as tendências observadas e a distribuição das aplicações da blockchain por setores industriais. O capítulo analisa criticamente os impactos mais significativos da tecnologia, incluindo a rastreabilidade, a transparência, a automatização e a sustentabilidade dos processos. São discutidas também as principais barreiras à adoção e as tendências tecnológicas emergentes identificadas na literatura.

O **Capítulo 5 – Síntese e Análise do Trabalho Desenvolvido** integra e discute criticamente os conhecimentos obtidos, destacando os contributos teóricos, os impactos observados, as principais conclusões parciais e as limitações identificadas ao longo do estudo.

Por fim, o **Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimento Futuro** apresenta as conclusões globais do trabalho, sintetizando os contributos alcançados e propondo direções para futuras investigações que possam aprofundar o potencial da

blockchain no contexto industrial, reforçando a sua importância enquanto tecnologia emergente para a transformação digital das organizações.

Com esta estrutura, assegura-se uma leitura progressiva e coerente, em conformidade com os princípios da Revisão Sistemática da Literatura, permitindo ao leitor compreender, passo a passo, desde o enquadramento inicial até à discussão crítica dos resultados, de que forma a *blockchain* se apresenta como uma tecnologia relevante e transformadora no âmbito da implementação da mesma na indústria.

Capítulo 2

Metodologia de estudo

Este capítulo apresenta o enquadramento metodológico adotado para o desenvolvimento da investigação, descrevendo o processo de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) utilizado. O capítulo explica as etapas seguidas segundo o protocolo *PRISMA*, desde a definição das palavras-chave até à seleção e análise dos artigos científicos. São indicadas as bases de dados consultadas e a justificação da sua escolha. Este capítulo evidencia os procedimentos de organização, filtragem e tratamento da informação, assegurando transparência e reprodutibilidade dos resultados.

2.1. Descrição da revisão sistemática de literatura

A revisão da literatura é uma análise crítica e resumida de estudos e trabalhos já publicados sobre um determinado tema. Tem como objetivo identificar o estado atual do conhecimento, principais desenvolvimentos, metodologias e problemas existentes na investigação. Existem três tipos de revisão literária, sendo eles a revisão narrativa, sistemática ou integrativa, dependendo do grau de profundidade e do método utilizado (Fan *et al.* 2022).

A revisão da literatura narrativa, ou tradicional, é a revisão mais utilizada em diversos casos de estudo. O seu objetivo é fornecer uma visão geral e descritiva sobre o tema de estudo. A sua principal vantagem é a sua flexibilidade, permitindo ao investigador apresentar uma visão abrangente do tema em estudo e resumir uma grande quantidade de informação.

A revisão sistemática da literatura, em inglês como *Systematic Literature Review*, ao contrário da revisão narrativa segue um método rigoroso e estruturado, com critérios previamente bem definidos para a seleção e análise de estudos. Tem como objetivo garantir que todas as evidências relevantes sejam consideradas de modo transparente e objetivo. Um dos seus benefícios é, proporcionar uma visão completa e imparcial sobre o caso em estudo, permitindo que haja uma validade científica (Paul *et al.*, 2021). Diversos autores propõem *frameworks* metodológicos para a sua aplicação. Por exemplo, Chong *et al.* (2022), identificam seis fases fundamentais e vinte etapas recomendadas para a condução de RSL's na área da educação superior, garantindo maior rigor, replicabilidade e robustez metodológica ao processo de revisão. Além disso, Harari *et al.* (2020), enfatizam a importância de estratégias de busca bem delineadas e estruturadas em bases de conhecimento como o *Scopus*, *Web of Science* e *ScienceDirect* para maximizar a abrangência e minimizar redundâncias na seleção dos estudos utilizados.

A revisão da literatura integrativa tem ganho destaque em áreas onde a combinação de diferentes tipos de dados se torna fundamental para o tema em estudo. Oferece uma visão mais completa e diversificada do problema em estudo. É um tipo de revisão pouco utilizado pois pode se tornar complexa devido à necessidade de lidar com diferentes tipos de dados, exigindo processos rigorosos de avaliação e síntese. Como exemplo, Santos *et al.* (2019), descrevem a aplicação da

revisão integrativa em seis fases: identificação do problema, definição de critérios, categorização, análise crítica, interpretação e apresentação dos resultados, o que permite integrar evidências qualitativas e quantitativas de forma sistematizada.

2.2. Abordagem metodológica adotada

Para a realização do levantamento do estado da arte neste trabalho, foi utilizado o método de revisão sistemática da literatura, conhecido em inglês como *Systematic Literature Review*. Este método possibilita o acesso a várias contribuições de diferentes autores, bem como a análise e síntese dos resultados, permitindo assim tirar conclusões sobre o que se conhece ou desconhece acerca de um tema específico. A revisão sistemática é considerada a forma mais robusta de evidência científica, pois os resultados obtidos provêm de um estudo aprofundado de outros trabalhos, selecionados de acordo com um rigoroso protocolo e sujeitos a revisão por pares (Paul *et al.* 2021).

A escolha desta abordagem metodológica justifica-se pelo facto de a *blockchain* constituir uma tecnologia emergente, cuja aplicação prática na indústria ainda se encontra em processo de consolidação. Assim, em vez de recorrer a estudos de campo primários, considerou-se mais adequado analisar criticamente a literatura científica existente, permitindo identificar padrões, falhas e tendências de investigação.

A adoção desta abordagem metodológica permitiu, por um lado, garantir a validade científica dos resultados obtidos, dado que apenas foram considerados artigos presentes em bases de dados de elevado rigor e, por outro, alinhar a investigação com os objetivos do trabalho, nomeadamente compreender as principais aplicações industriais da *blockchain*, identificar benefícios e limitações comuns e destacar oportunidades para investigação futura.

2.3. Protocolo utilizado

Na realização de uma revisão sistemática da literatura, a escolha do protocolo metodológico adequado é essencial para garantir a rastreabilidade, transparência e rigor científico dos procedimentos. Atualmente, existem várias diretrizes amplamente reconhecidas para orientar a elaboração e a publicação de revisões

sistemáticas da literatura, cada uma com objetivos específicos e diferentes áreas de aplicação. Entre as mais utilizadas destaca-se o protocolo *PRISMA* (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), um conjunto de recomendações criado com o propósito de melhorar a qualidade dos trabalhos de revisão sistemática da literatura e meta-análises. O *PRISMA* fornece ferramentas e fluxogramas estruturados que ajudam os investigadores a apresentar, de forma clara e transparente, todas as etapas do processo de seleção, análise e síntese dos estudos incluídos. Embora tenha sido inicialmente desenvolvido no contexto da saúde, o *PRISMA* é atualmente amplamente adotado em diversas áreas do conhecimento, incluindo tecnologias emergentes e engenharia (Page *et al.* 2021).

Outros protocolos relevantes incluem o *Cochrane Handbook*, sendo esta mais utilizado para revisões sistemáticas da literatura na área clínica, e o *Manual JBI* (*Joanna Briggs Institute*), que abrange uma variedade de abordagens, como revisões qualitativas e mistas, com maior aplicação em saúde pública e ciências sociais. O protocolo *PROSPERO*, por outro lado, não é uma diretriz metodológica, mas sim uma plataforma de registo de protocolos de revisão, muito utilizada na área biomédica para assegurar a transparência e evitar duplicações de esforços (Higgins *et al.* 2019).

Para a realização deste trabalho o protocolo escolhido será de acordo com a abordagem de orientação *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyse* (*PRISMA*). A abordagem *PRISMA* é um conjunto de diretrizes que procuram garantir a transparência, rigor e reprodutibilidade na condução e elaboração de revisões sistemáticas da literatura. Este protocolo tem como objetivo orientar os investigadores a seguir uma ordem de etapas, como a formulação clara da pergunta de investigação, a definição de critérios de inclusão/exclusão, a realização de investigações abrangentes em bases de dados e a análise e síntese dos dados. Além disso, a abordagem inclui um diagrama de fluxo que documenta o processo de seleção de estudos, promovendo clareza e precisão na apresentação dos resultados (Page *et al.* 2021).

A escolha do protocolo *PRISMA*, apesar da sua origem na área da saúde, justifica-se pelo seu carácter abrangente e pela capacidade de estruturar de forma clara e sistemática o processo de revisão da literatura. No contexto da engenharia, onde a aplicação de tecnologias emergentes como a *blockchain* exige uma análise

criteriosa da literatura existente, a utilização de uma abordagem robusta e bem estabelecida como o *PRISMA* assegura a consistência metodológica e a validade dos resultados. Esta escolha permite ainda garantir a reprodutibilidade do processo de revisão, uma vez que todas as etapas são descritas com detalhe suficiente para que outros investigadores possam replicar o estudo, promovendo, assim, a integridade científica e a comparação entre estudos.

A utilização do protocolo *PRISMA* nesta tese reforça, assim, a credibilidade dos resultados obtidos e garante que a revisão segue princípios metodológicos internacionalmente reconhecidos, contribuindo para uma análise crítica e fundamentada do estado da arte sobre a aplicação da *blockchain* na indústria.

2.4. Questões de pesquisa

As questões de pesquisa constituem um elemento central em qualquer Revisão Sistemática da Literatura (RSL), uma vez que delimitam o âmbito da investigação, orientam a seleção dos estudos e estruturam a análise crítica dos resultados. A definição prévia destas questões permitiu assegurar a coerência metodológica e a relevância científica do estudo, garantindo que a revisão fosse conduzida de forma objetiva, consistente e alinhada com os objetivos definidos anteriormente.

No presente trabalho, as questões de pesquisa foram elaboradas com base numa reflexão inicial sobre o tema da tecnologia *blockchain* aplicada ao contexto industrial e da produção, tendo em conta a sua relevância para os domínios da engenharia. Estas questões serviram como guia orientador para a recolha, análise e síntese da literatura científica, permitindo identificar lacunas, tendências e oportunidades de investigação futura.

As questões de pesquisa formuladas são as seguintes:

- I. O que é a tecnologia *blockchain* e como é conceptualizada no contexto industrial?
- II. Em que medida a *blockchain* tem sido implementada em setores industriais e produtivos?
- III. Qual o nível de maturidade da tecnologia *blockchain* nas cadeias de abastecimento e nos sistemas de produção?

- IV. Quais os principais benefícios, desafios e barreiras associados à adoção da *blockchain* na indústria?
- V. De que forma a *blockchain* contribui para a rastreabilidade, transparência e sustentabilidade das operações industriais?
- VI. Que metodologias e abordagens tecnológicas têm sido aplicadas para a implementação da *blockchain* na indústria?
- VII. Quais são as tendências e direções futuras da investigação sobre *blockchain* em contextos industriais?

Estas questões foram pensadas para cobrir tanto o enquadramento teórico e conceptual como as dimensões práticas e tecnológicas, terminando com a perspectiva de evolução científica e industrial. Assim, as questões de pesquisa constituíram a base orientadora de toda a revisão sistemática apresentada.

2.5. Critérios de elegibilidade

Para garantir a qualidade e a relevância dos estudos incluídos nesta revisão sistemática, foram definidos critérios de elegibilidade rigorosos. Estes critérios estabeleceram parâmetros claros sobre quais estudos foram considerados para inclusão ou exclusão. A definição destes critérios foi essencial para assegurar que apenas os estudos mais pertinentes e com qualidade fossem analisados, permitindo uma síntese robusta e fidedigna das evidências disponíveis. A tabela seguinte (tabela 2.1), apresenta os critérios de inclusão e exclusão utilizados na investigação.

Tabela 2.1 - Critérios de Inclusão e exclusão

Típos de critério	Critério	Definição
Inclusão	Tópicos de investigação	Artigos científicos relacionados com <i>Blockchain</i> na indústria.
	Idioma	Artigos em inglês.
	Intervalo de tempo	Artigos publicados desde 2018 até à data.
Exclusão	Artigos que não estão relacionados com o caso em estudo	Artigos sobre <i>Blockchain</i> fora do contexto industrial
		Publicações fora do prazo definido
		Artigos científicos duplicados
		Artigos não revistos por pares ou de baixa qualidade

2.6. Bases de dados e termos de investigação selecionados

Os artigos desta revisão foram investigados através do *Science Direct*, da base de dados *Scopus* e através da *Web Of Science*. Os termos da investigação foram os seguintes:

- *Blockchain*;
- *Industry*;
- *Digital transformation*;
- *Bitcoin*;
- *Digital technology*;
- *Production*;
- *Logistic*;
- *Raw Material*;
- *Manufacturing*;
- *Complexity*;

- *Flexibility*;
- *Production control*;
- *Planning*;
- *Variability*;
- *Globalization*.

2.7. Estratégias de busca e análise

Através dos critérios de inclusão e exclusão definidos anteriormente e com as palavras-chave em cima apresentadas, na tabela 2.2, estão apresentadas as sintaxes utilizadas nessas bases de dados. Os termos utilizados foram separados por expressões booleanas como *AND* e *OR* de modo a conduzirem a investigação aos termos que se pretende investigar e fazer uma melhor filtragem. A utilização do “*” (asterisco) tem como objetivo incluir termos da mesma família de palavras, ou seja, tendo por exemplo o termo *produc**, com a utilização do asterisco a investigação vai abranger as palavras “*product*” e “*production*”.

Tabela 2.2 - Sintaxes utilizadas nas bases de dados

Base de dados	Termos de investigação
<i>Scopus</i>	<i>TITLE-ABS-KEY ("Blockchain") AND TITLE-ABS-KEY ("Internet Of Things") AND TITLE-ABS-KEY (industry OR "digital transformation" OR bitcoin) AND TITLE-ABS-KEY (Product* OR "Digital technology" OR Logistic OR "Raw material" OR Manufactur* OR Complexity OR Flexibility OR "Production Control" OR Planning Or Variability OR Globalization)AND NOT (Food OR Building* OR Healt*) AND NOT (mathematics* OR economy* OR "decision sciences") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"cp")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English"))</i>
<i>Web of science</i>	<i>TS=("Blockchain") AND TS=("Internet Of Things") AND TS=(industry OR "digital transformation" OR bitcoin) AND TS=(Product* OR "Digital technology" OR Logistic OR "Raw material" OR Manufactur* OR Complexity OR Flexibility OR "Production Control" OR Planning Or Variability OR Globalization) NOT TS=(Food OR Building* OR Healt*) NOT TS=(mathematics* OR economy* OR "decision sciences")</i>
<i>Science Direct</i>	<i>Blockchain AND Internet of things AND industry AND AR AND CP</i>

Na tabela 2.3, encontram-se apresentadas as fontes das quais se utilizou informação para a realização do presente trabalho. Tendo como principal foco em artigos científicos presentes em revistas e conferências.

Tabela 2.3 - Fontes utilizadas

Journal of Manufacturing Systems

Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology

International Journal of Industrial Engineering Computations

Journal of Computers and Industrial Engineering

International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences

Journal of Industrial Management and Data Systems

Journal For Manufacturing Science and Production

Journal of Engineering, Technology and Applied Science Research

International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration

International Journal of Production Economics

International Journal of Production Research

International Journal of Advanced Manufacturing Technology

Production and Operations Management Journal

Journal of Manufacturing Processes

Na figura 2.1 está representada por anos a percentagem referente aos artigos selecionados para a realização deste trabalho. Deste modo é possível verificar se o tema abordado é um tema novo que está a suscitar interesse e a ser cada vez mais estudado e falado ou se é algo que já tem vindo a ser estudado e implementado há mais tempo. Como se pode ver na figura 2.1, a partir do ano 2020 houve um aumento significativo de artigos publicados relacionados com a implementação da tecnologia *blockchain* na indústria, o que mostra que é uma tecnologia recente e que esta a suscitar interesse e a ser cada vez mais estudada e investigada.

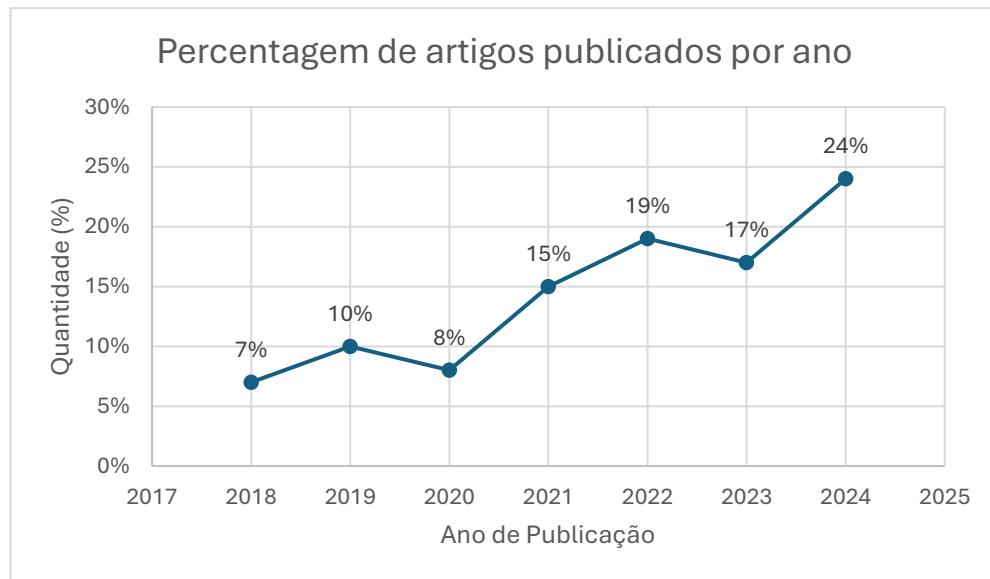


Figura 2.1 - Percentagem de artigos utilizados publicados por ano

No protocolo *PRISMA* da revisão sistemática da literatura, existe todo um processo que deve ser feito para se chegar aos estudos incluídos na síntese qualitativa utilizados no trabalho final. Para tal, existem 4 etapas que devem ser realizadas e que estão descritas na figura 2.2. A primeira etapa é a identificação, onde se faz uma investigação inicial nos diversos motores de investigação, neste caso, o *Scopus* e o *Science Direct*, e é apresentado o número total de publicações potencialmente relevantes. Na segunda etapa, denominada como rastreio, é feita uma exclusão dos artigos que estão duplicados e posteriormente exclusão de artigos a nível de título e resumo. Desse número mais reduzido de artigos é feita outra seleção de modo a verificar a elegibilidade dos artigos. Por fim, depois de todas as etapas feitas e após utilização correta do protocolo *PRISMA* foi obtido o número de artigos potencialmente relevantes para o caso de estudo, sendo possível, incluir artigos extra que apresentem conteúdo importante para o estudo em questão.

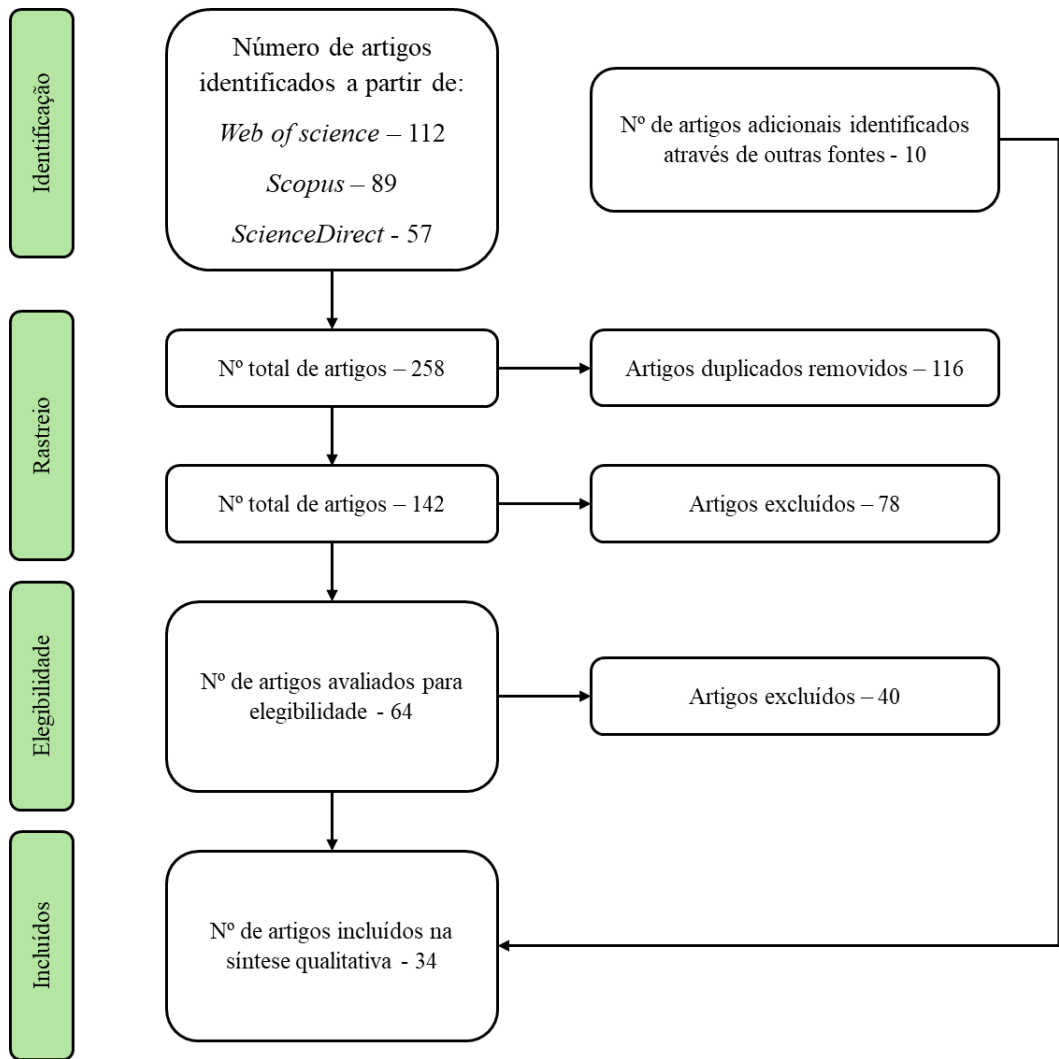


Figura 2.2 - Protocolo *PRISMA*

Capítulo 3

Enquadramento do trabalho

Este capítulo aborda a aplicação da tecnologia blockchain no contexto da Indústria 4.0, analisando as suas bases e integração com outras tecnologias emergentes. Explora os princípios e características da Indústria 4.0, destacando a importância da integração na transformação digital das empresas. Discute o papel da blockchain na segurança, rastreabilidade e automatização dos processos produtivos, bem como as barreiras e benefícios associados à sua implementação. Este enquadramento fornece a base teórica para compreender o impacto da blockchain na indústria atual.

3.1. Introdução e critérios de seleção do estado da arte

A presente secção tem como objetivo apresentar a revisão feita e analisar o estado da arte relativo à aplicação da tecnologia *blockchain* em diferentes sectores industriais, com base na revisão sistemática da literatura realizada. Pretendeu-se identificar as principais áreas de aplicação, as principais melhorias e benefícios, os desafios e barreiras associados à sua adoção, bem como as lacunas que permanecem em aberto e que justificam investigação futura.

De forma a garantir rigor e transparência metodológica, a revisão foi conduzida segundo o protocolo *PRISMA*, já apresentado anteriormente. Apenas foram incluídos artigos indexados em bases de dados de elevada credibilidade científica, nomeadamente *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web of Science*, assegurando que a análise assenta em contributos validados pela comunidade académica.

3.2. Indústria 4.0

Na indústria tem vindo a existir cada vez mais desenvolvimentos tecnológicos em larga escala, originando assim um novo tipo de indústria onde é possível interligar máquinas e operadores, conhecida como indústria 4.0 (fig. 3.1). Estes avanços tecnológicos procuram combinar vários domínios tecnológicos de modo a melhorar processos, resultados e qualidade final do produto. De todos estes desenvolvimentos tecnológicos há uns que se sobressaem sendo eles a *Internet of Things (IoT)*, a tecnologia *blockchain*, a inteligência artificial e processos aditivos como a impressão 3D (Aoun *et al.* 2021).

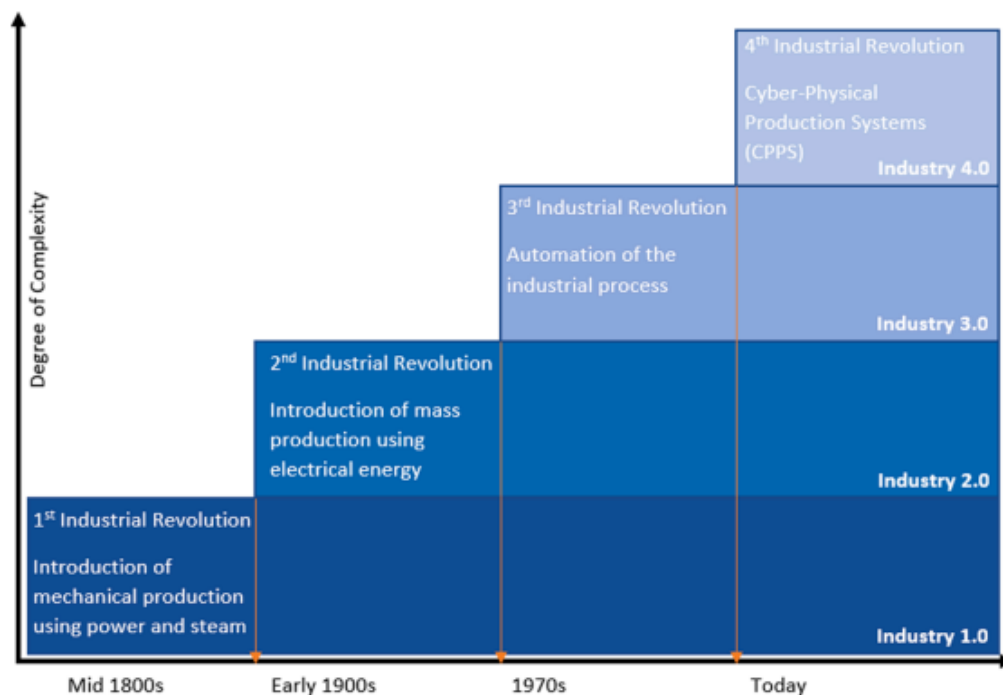


Figura 3.1 - Revolução industrial ao longo do tempo. (Aoun *et al.* 2021)

Atualmente as empresas devem apresentar processos produtivos flexíveis, ágeis e reativos para que as empresas apresentem um nível de competitividade que consiga manter a exigência do mercado internacional. Para tal, é necessário projetar de forma adequada e sistemática as atividades e processos da empresa e integrar novas tecnologias, baseadas em métodos eficientes.

A tecnologia *blockchain* desempenha um papel importante na Indústria 4.0, fornecendo uma base segura e transparente para a troca de informações e operações digitais. A tecnologia oferece várias vantagens quando integrada aos processos industriais, especialmente em cadeias de suprimentos, transações e controle de qualidade (Enrique *et al.* 2021).

Segundo Aoun *et al.* 2021, apesar de a implementação da indústria 4.0 proporcionar às empresas grandes benefícios e possibilidades de superar alguns desafios, esta mesma implementação ainda apresenta alguns desafios e dificuldades a serem superadas, sendo eles:

- Custos elevados de manutenção – Um dos principais problemas que se coloca na implementação da indústria 4.0 é o custo elevado da implementação de toda a infraestrutura tecnológica necessária e formação que os colaboradores têm de apresentar. Sendo estes

requisitos essenciais para a implementação de sistemas como a *IoT*, inteligência artificial, *blockchain* entre outras.

- Gestão de dados - As grandes quantidades de dados produzidas pelas tecnologias da indústria 4.0, além de precisarem de ser bem geridos também apresentam grandes preocupações quanto à segurança e privacidade desses mesmos dados;
- Falta de trabalhadores qualificados - A implementação da indústria 4.0 exige conhecimento especializado em áreas como engenharia de software, análise de dados e outros tipos de formações que diversas empresas ainda não tem departamentos especializados para tal;
- Integração - A integração de diversas tecnologias e sistemas pode ser difícil, principalmente se forem criados por diversos fornecedores que utilizem protocolos de comunicação diferentes. Desta forma, é necessário garantir que todos esses sistemas consigam comunicar entre si sem problemas;
- Oposição à mudança - Uma vez que a indústria 4.0 exige novas formas de gerir processos de fabricação e operação, a sua implementação exige uma transformação cultural considerável, principalmente a nível económico;
- Problemas de segurança: a conexão e automação aprimoradas da indústria 4.0 apresentam novas ameaças à segurança. O risco de ataques cibernéticos aumenta à medida que mais dispositivos e sistemas são integrados.

O principal critério que define a indústria 4.0 é a capacidade de esta ter uma automatização a nível de tomadas de decisão e processos de resolução de problemas. Isto é, a possibilidade de gerir tanto os ativos como a gestão em tempo real do desempenho operacional, enquanto engloba todos os interessados com recurso a uma integração vertical e horizontal. A integração vertical procura responder rapidamente às constantes alterações de encomendas resultantes da flutuação da procura, da falha de equipamento ou da falta de stocks. Esta integração baseia-se numa rede de interconexões entre os processos digitais e físicos nos diferentes departamentos e secções da indústria. A integração horizontal, em comparação à integração vertical, é conseguida com base na ligação em rede dos

diferentes processos, entidades e serviços que formam a cadeia de valor global do produto.

Com base nestas integrações, é possível obter a disponibilidade em tempo real e a avaliação dos dados gerados pelos diferentes processos físicos e mecânicos, como logística de entrada e armazenamento, investigação e desenvolvimento, produção, marketing e vendas para serviços, permitindo um fluxo transparente de informações ao longo de toda a cadeia de valor, de modo a combater as flutuações do mercado e aumentar a velocidade de resposta a estas mesmas.

A implementação destas integrações exige um elevado nível de coordenação entre todas as entidades e partes envolvidas e uma administração integrada que nem sempre está disponível. Para além disto, existem grandes barreiras para a implementação da indústria 4.0 sendo uma delas a preocupação que as empresas têm em depender de um prestador de serviço para guardar e operacionalizar todos os dados da empresa. Outra das barreiras é a falta de conhecimento “*know-how*” para implementar e manter as medidas da indústria 4.0 com sucesso e a ausência de incentivo dos departamentos de gestão para lançar este tipo de digitalização radical.

Para solucionar estas barreiras, principalmente a nível de não ser necessário a presença de um prestador de serviços para guardar os dados da empresa, em diversas definições da Indústria 4.0 a tecnologia *blockchain*, integrada com tecnologias como a *Internet of Things* (IoT), Inteligência Artificial (IA) e a tecnologia *Machine Learning and cyber-physical systems* é considerada uma das principais tecnologias condutoras para a implementação da indústria 4.0 na indústria. Conseguindo responder à maior parte das dificuldades e desafios, oferecendo segurança e preservação da privacidade (Enrique *et al.* 2021).

Segundo Aoun *et al.* 2021, atualmente a indústria 4.0 traduz-se em quatro principais características, sendo elas:

Integração Vertical (*Vertical Networking*) – A principal característica da indústria 4.0 é a integração vertical de sistemas de produção inteligentes (fig. 3.2). Esta integração cria uma ligação entre os diferentes níveis da indústria, desde a produção até à supervisão, controlo e monitorização da produção, departamento de qualidade, gestão e processamento do produto, entre outros. Esta ligação permite uma circulação de dados suave e transparente permitindo serem tomadas decisões

táticas e estratégicas. Esta integração tem como principal foco a tecnologia de *Cyber-Physical Production Systems* (CPPSs) de modo a permitir as indústrias responderem de forma rápida e eficaz às diferentes procuras e demandas do mercado, ou até mesmo uma quebra de stock ou uma avaria inesperada.

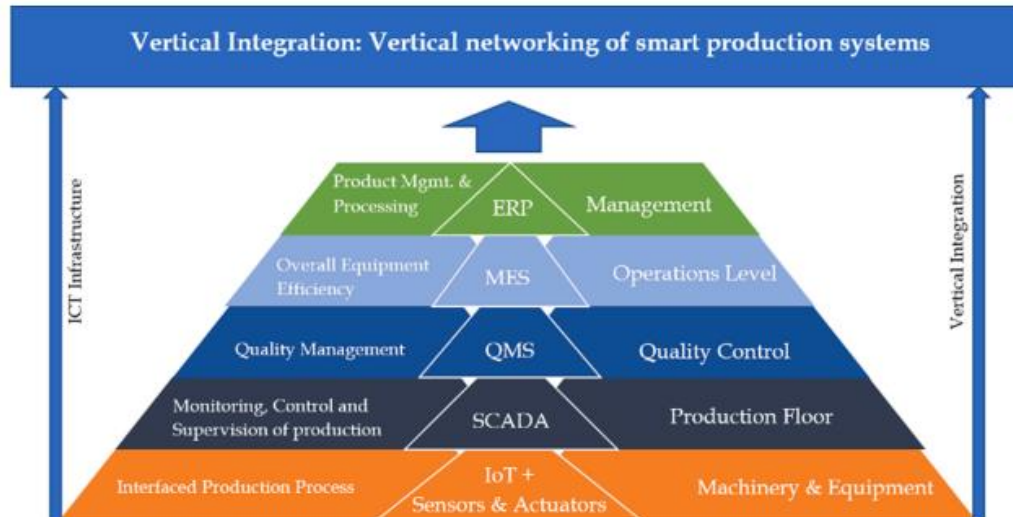


Figura 3.2 - Integração Vertical (Aoun *et al.* 2021)

Integração horizontal (*Horizontal Integration*) – A integração horizontal é a segunda característica da indústria 4.0, onde é formada a rede de todos os processos, entidades e serviços que formam a cadeia global de valor do produto. Ao contrário da integração vertical que procura um elevado nível de coordenação entre a produção e os níveis superiores de gestão, a integração horizontal ocorre em diferentes níveis, sendo eles, o chão de fábrica, as diversas instalações industriais e ao longo de toda a cadeia de valor do produto. Cada máquina conectada ou unidade de produção torna-se um nó com propriedades bem definidas dentro da rede de produção. Estes nós posteriormente comunicam constantemente o seu estado de modo a responderem automaticamente às necessidades da produção, procurando a melhor solução a nível de custo-eficiência e redução do tempo de paragem (*downtime*) durante as manutenções preventivas.

No caso de a empresa apresentar mais do que uma instalação a integração horizontal faz com que seja possível partilhar informação sobre os níveis de inventário e atrasos inesperados e redistribuir trabalho entre as diferentes instalações da empresa de modo a responder à demanda do mercado ou aprimorar a eficiência e rapidez dos processos de produção (fig. 3.3). Deste modo, a integração

horizontal permite criar uma cadeia de valor transparente que é atualizada em tempo real, providenciando alto nível de flexibilidade para responder à rápida mudança do mercado, resolução de problemas e facilitando a otimização dos processos de produção. Esta integração permite que, como qualquer produto ou parte tem um histórico este mesmo possa ser acessado a qualquer hora permitindo o constante rastreamento do mesmo, esta função também é conhecida como “*Product memory*”.

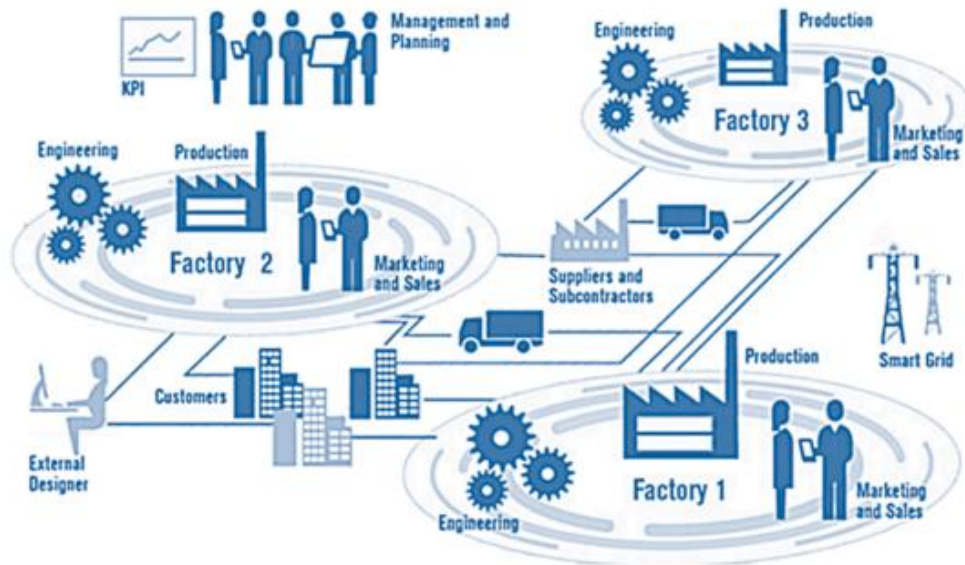


Figura 3.3 Integração horizontal (Aoun *et al.* 2021)

Trough-Life Engineering (TLE) – A Terceira característica é a adoção de uma *TLE* ao longo de toda a cadeia de valor do produto, abrangendo todo o seu ciclo de vida. A *TLE* é baseada no conceito de expandir o design de produção para além do processo produtivo de modo a cobrir todos os aspetos da cadeia de valor desde o desenvolvimento até a decadência do produto. Este processo, cria uma colaboração entre o processo de produção de qualquer produto e os diversos processos e serviços incluídos na cadeia de valor, como por exemplo, a procura de matéria-prima, a entrega do produto e o serviço de venda. A *TLE* tem como objetivo ser possível fazer uma colheita de informação ao longo de todo o ciclo de vida do produto, desde o desenvolvimento ao protótipo e por fim na sua produção. Esta informação irá permitir uma melhor eficiência e flexibilidade dos ciclos de produção, desenvolvimentos futuros e maximiza o valor do produto.

Aceleração com base em tecnologias exponenciais – Como resultado das transformações digitais implementadas em diferentes setores, a adoção crescente de

tecnologias exponenciais como a inteligência artificial (IA), a impressão 3D, a *Internet of Things*, entre outras, está a alterar as abordagens convencionais de gestão das empresas e a criar não só novos modelos de negócio, mas também novas fontes de receitas. O impulso da indústria 4.0 apresenta um ritmo não linear, devido a essas mesmas tecnologias exponenciais que criam mudanças repentinas nos processos digitais. Estas tecnologias aumentam a autonomia e aceleram a individualização e flexibilidade com recurso a soluções adaptadas e ao mesmo tempo contribuindo para a redução de desperdícios e consequentemente reduções de custos. A implementação destas tecnologias exponenciais não é só útil, mas quase imprescindível de modo a ultrapassar e resolver barreiras e desafios característicos à implementação da indústria 4.0.

3.3. *Internet of things*

A *Internet of Things (IoT)* (fig. 3.4) é uma das principais tecnologias da Indústria 4.0, desempenhando um papel fundamental na transformação digital das indústrias. No contexto industrial, a *IoT* integra máquinas, dispositivos e sensores a redes de comunicação, permitindo a obtenção e troca de dados em tempo real. Isso resulta em uma maior automação, eficiência operacional e otimização de processos. A *IoT* permite ao recolher dados contínuos sobre o desempenho das máquinas, prever falhas potenciais antes que elas ocorram, evitando paragens não programadas e reduzindo custos de manutenção, aumentando a eficiência operacional. Com base nos dados contínuos é possível também por meio de dados a tempo real obter informação sobre o desempenho das máquinas e o fluxo de produção, permitindo que a *IoT* ajuste automaticamente as operações para melhorar a eficiência, reduzindo desperdícios e aumentando a qualidade do produto final, combatendo o mercado atual que procura uma produção mais flexível a mudanças.

- **Fiabilidade** – No uso de tecnologia *blockchain*, é possível validar a autenticidade de cada transação assim como o responsável pela mesma. Estas características da tecnologia *blockchain*, tornam esta solução descentralizada uma opção na integração de sistemas *IoT* para o desenvolvimento do conceito *i4.0*.

Os sistemas *IoT* procuram tirar partido de sensores para melhorar a produtividade e qualidade do produto final em tempo real. Este conceito só é possível devido ao suporte da *internet* que atualmente apresenta um nível de globalização e interoperabilidade elevadíssimo. Independentemente desta tecnologia estar mais orientada para a indústria ou para o consumidor final, os sistemas *IoT* realçam as ligações entre os objetos através de endereços físicos, enquanto que a *Internet Industrial* mostra padrões futuros da indústria mais prováveis com base em novas tecnologias. Os principais benefícios da implementação da *IoT* vem através da mesma residir na procura, investigação e partilha de informação e recursos a tempo real. A *IoT* pode ainda ser maximizada e melhorada sendo combinada com outras tecnologias emergentes da indústria 4.0 como por exemplo a análise e modelação de dados, a *Machine Learning*, *Fog Computing* e a tecnologia *blockchain* (fig. 3.5).

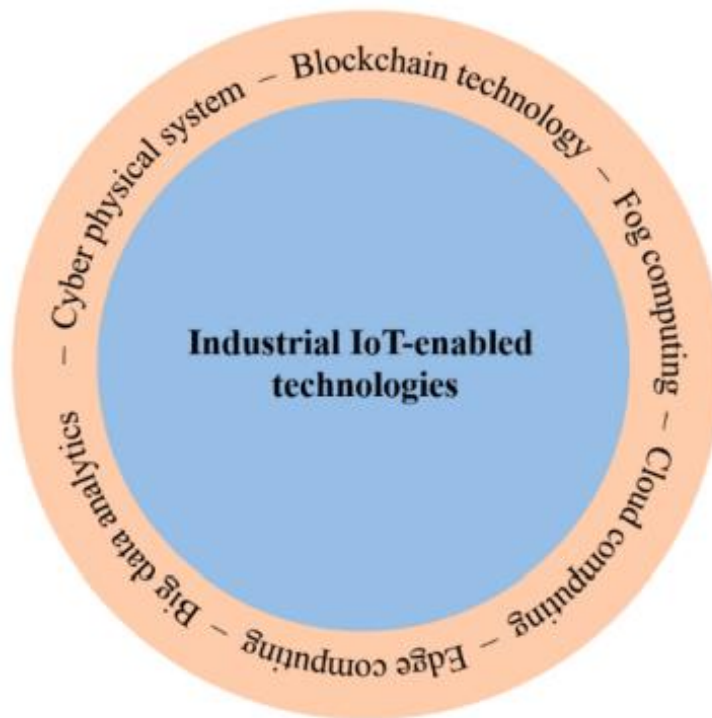


Figura 3.5 Tecnologias emergentes indústria 4.0 (Ahmed et al. 2023)

Um dos problemas para a *IoT* não chegar ao seu potencial máximo é a falta de segurança adequada para que a mesma possa operar sem qualquer tipo de problema. A tecnologia *Cyber Physical System (CPS)*, é uma das tecnologias fundamentais da Indústria 4.0 que utiliza sistemas inteligentes incorporados em máquinas de produção para ligar os sectores da indústria ao ambiente real. Este em interligação com a *IoT* cria uma ligação entre o mundo real da produção com o virtual, criando assim as conhecidas *Smart Factories* permitindo assim um ambiente industrial interativo.

Esta integração entre *CPS* e *IoT* melhora a eficiência, reduz custos operacionais e aumenta a flexibilidade e segurança dos processos industriais. Sendo ela uma peça fundamental para a transformação digital da indústria.

Nas *Smart Factories* uma das aplicações mais importantes da *IoT* é a manutenção preventiva. Esta aplicação procura ajudar na minimização do tempo de paragem não programado (*downtime*) ao longo da produção. A manutenção preventiva procura minimizar o tempo de paragem dos equipamentos e consequentemente aumentar a produtividade dos mesmos ao longo do processo de fabrico, utilizando dados e análises para calcular o tempo de reparação de máquinas e equipamentos. O processo pode ser utilizado para evitar períodos de inatividade, reduzir os custos de manutenção e prolongar o tempo de funcionamento do equipamento.

A *IoT* pode facilitar a manutenção preventiva através da monitorização contínua do estado das máquinas e dos equipamentos, da identificação de potenciais falhas antes que estas ocorreram e do fornecimento de um plano de manutenção que vai sendo atualizado e implementado em tempo real. Isto é possível com recurso a sensores integrados à *IoT* que permitem recolher e comunicar informações sobre máquinas e equipamentos, incluindo informações sobre temperatura, vibração e utilização de energia durante o seu funcionamento (Ahmed *et al.* 2023).

Capítulo 4

Resultados da Revisão

Sistemática da literatura

Este capítulo descreve os resultados obtidos da revisão da literatura sobre a aplicação da tecnologia blockchain à indústria, nomeadamente artigos selecionados, distribuição por setores e principais áreas de aplicação, com destaque para a rastreabilidade, gestão da cadeia de abastecimento e automação através de contratos inteligentes. São ainda analisados os níveis de maturidade e as tendências emergentes, permitindo entender o impacto da blockchain na eficiência, transparência e sustentabilidade, e fornecer o base para as conclusões e perspectivas do capítulo seguinte.

4.1. Blockchain

Tendo em conta o tema do trabalho, foi necessária uma abordagem geral de modo a entender o conceito da tecnologia *blockchain* e qual a sua importância na indústria e as suas aplicações na indústria 4.0.

4.1.1. Tipos de sistemas

No contexto industrial, especialmente com a crescente digitalização e automatização dos processos, como na indústria 4.0, a escolha entre sistemas centralizados e descentralizados tem um impacto direto na eficiência, segurança e flexibilidade dos processos.

Os Sistemas centralizados são tradicionalmente utilizados por muitas indústrias para gerir dados de produção, logística, manutenção e cadeia de abastecimento. Nesse modelo, uma única entidade, normalmente um servidor central ou um sistema de gestão empresarial (ERP), fig. 4.1, coordena todas as atividades e decisões da empresa.

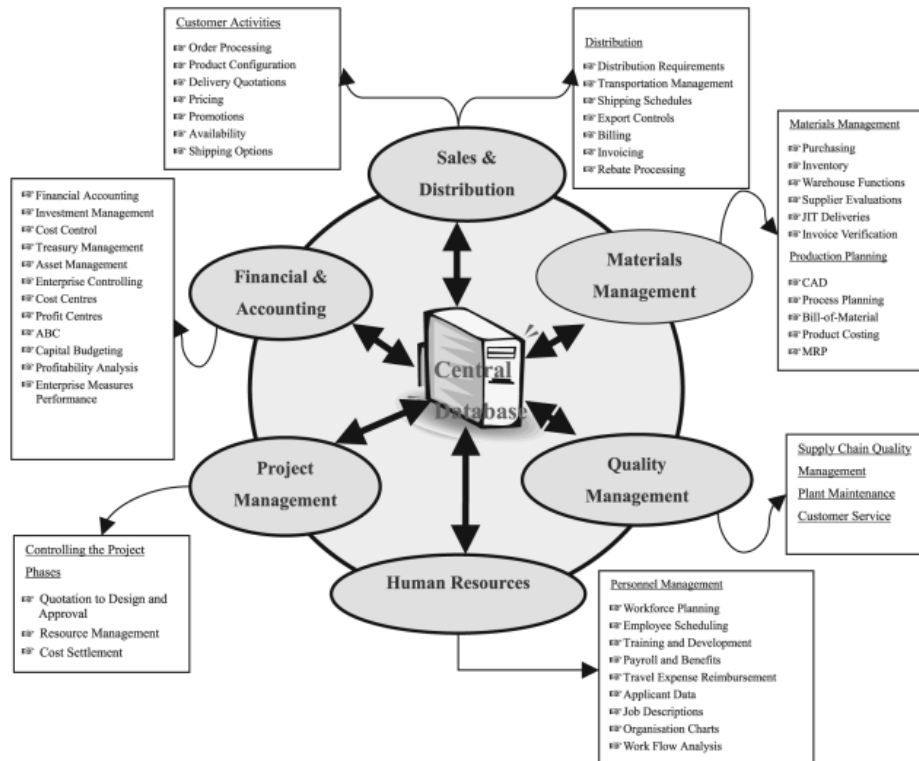


Figura 4.1 - Sistema ERP (Shehab *et al.* 2004)

Essa abordagem facilita a supervisão e o controle, reduz a complexidade inicial da infraestrutura e permite respostas rápidas a eventos em tempo real. No entanto, cria também um ponto único de falha. Ou seja, qualquer falha técnica, ataque informático ou erro humano pode comprometer todo o sistema. Além disso, o controle centralizado dos dados pode levantar preocupações em relação à privacidade e à integridade da informação, especialmente em cadeias produtivas complexas que envolvem vários fornecedores.

Por outro lado, os sistemas descentralizados, fig. 4.2., que começaram a surgir devido à tecnologia *blockchain*, têm vindo a ganhar relevância em aplicações industriais onde a transparência, segurança e rastreabilidade são fundamentais. Num sistema descentralizado, cada participante da rede (fábricas, fornecedores, operadores logísticos) mantém uma cópia dos dados e participa no processo de validação das transações, sem depender de uma autoridade central. Isto torna o sistema altamente resistente a falhas e manipulações, além de permitir auditorias em tempo real, o que é particularmente valioso em certos sectores como o farmacêutico, o alimentar e o automóvel, onde o cumprimento das normas e a rastreabilidade são cruciais. No entanto, esta abordagem também apresenta desafios, como maior complexidade técnica, menor velocidade de processamento em determinados casos e custos operacionais mais elevados no início da implementação.

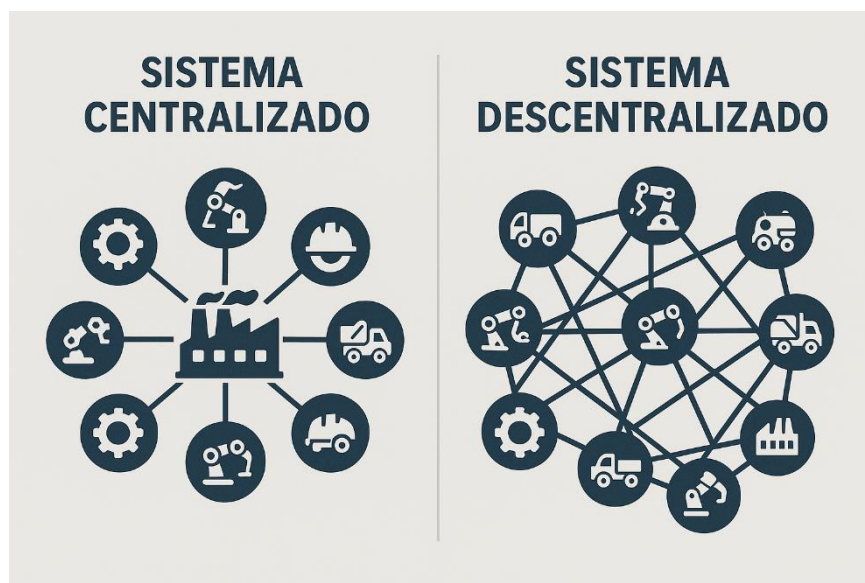


Figura 4.2 - Tipos de sistemas

4.1.2. Definição de *blockchain*

A *blockchain* é uma tecnologia de registo distribuído que, no contexto industrial, se apresenta como uma solução estratégica para garantir a integridade, transparência e rastreabilidade dos dados ao longo de cadeias de valor complexas e com múltiplos intervenientes. Estruturalmente, assenta numa cadeia de blocos encadeados e protegidos por mecanismos criptográficos, que são replicados e sincronizados em tempo real por uma rede descentralizada de nós. Cada bloco contém um conjunto de transações ou eventos relevantes como registos de produção, movimentações logísticas, medições de sensores ou validações de qualidade que, uma vez validados, se tornam imutáveis.

Esta característica de imutabilidade confere à *blockchain* uma utilidade particular em sectores industriais onde a fiabilidade dos dados é crítica. Ao eliminar ou reduzir a dependência de intermediários e sistemas centralizados, a tecnologia proporciona maior autonomia, confiança e eficiência nas interações entre fornecedores, fabricantes, distribuidores e entidades reguladoras. Na prática, a *blockchain* é utilizada para assegurar a rastreabilidade de matérias-primas e componentes, monitorizar ciclos de vida de equipamentos, certificar operações críticas e até automatizar processos através de contratos inteligentes (*smart contracts*), reduzindo riscos de erro ou fraude (Tabatabaei *et al.* 2023).

Contudo, a definição da *blockchain* não é totalmente consensual na literatura científica. Segundo Tabatabaei *et al.* 2023, coexistem múltiplas perspetivas que a caracterizam de maneiras distintas, enquanto alguns autores a descrevem sobretudo como uma estrutura técnica de blocos encadeados, outros enfatizam a sua função como mecanismo de eliminação de intermediários ou como infraestrutura para a execução de *smart contracts*. Esta diversidade conceptual demonstra que a *blockchain* deve ser entendida como um conceito multifacetado, que integra diferentes dimensões, técnica, organizacional e funcional dependendo do contexto de aplicação.

Complementarmente, Shrimali *et al.* 2022, sublinham que a *blockchain* resulta da convergência de três princípios fundamentais: descentralização, segurança criptográfica e transparência, que lhe conferem resiliência contra adulterações e manipulações. Por sua vez, Tripathi *et al.* 2021, reforçam a importância do

consenso distribuído como elemento central, garantindo que todos os nós da rede mantêm uma visão coerente e partilhada do registo, sem necessidade de confiança prévia entre os participantes.

A *blockchain* pode ser definida como uma tecnologia emergente que combina infraestrutura técnica robusta, mecanismos de confiança descentralizados e potenciais aplicações estratégicas, especialmente relevantes em cadeias de abastecimento industriais. A sua definição, longe de ser estática, continua a evoluir à medida que novas implementações e casos de uso expandem o seu âmbito conceptual e prático.

4.1.3. Tipos de blockchain

A tecnologia *Blockchain* tem vindo a revolucionar diversos setores desde o setor financeiro até mais recentemente o setor industrial. Esta tecnologia tem vários tipos, cada um com características, vantagens e desvantagens próprias.

Blockchain Pública - Neste tipo de *blockchain*, qualquer utilizador pode juntar-se à rede, participar na validade de transações, consultar o histórico completo e até desenvolver aplicações.

Este tipo de rede é totalmente descentralizado, o que significa que não há nenhuma entidade ou organização central a controlá-la, ou seja, o processo de validação de transações é alcançado de forma democrática, por meio de algoritmos como o *Proof of Work* (utilizado na *Bitcoin*) ou o *Proof of Stake*, utilizado em redes como a *Ethereum 2.0* ou *Cardano*.

Este tipo de *blockchain* é ideal para sistemas que procuram total transparência e independência, como por exemplo as criptomoedas, as organizações autónomas descentralizadas (*DAOs*) ou aplicações *WEB3* (*Smart contracts*). Este tipo de transparência e descentralização tende a tornar as redes públicas mais lentas, devido a qualquer utilizador poder participar na validação das transações e menos escaláveis, ou seja, menor capacidade da rede para lidar com um elevado número de transações (Sizan *et al.* 2025).

Blockchain Privada – Esta *blockchain* ao contrário da *blockchain* pública, é fechada e controlada apenas por uma única organização. Apenas utilizadores autorizados podem aceder à rede, submeter ou validar transações. Este tipo de

blockchain é normalmente implementado no contexto empresarial, onde o objetivo não é a descentralização total, mas sim melhorar a eficiência, segurança e rastreabilidade interna dos processos.

Este tipo de tecnologia, tem como vantagem principal a velocidade de processamento, já que, ao contrário da *blockchain* pública a validação das transações não passa por todos os utilizadores. Além disso, a privacidade é elevada e a integração com os sistemas existentes é mais simples.

Contudo, esta abordagem tem também as suas limitações. Como o controlo está concentrado numa única entidade, a *blockchain* privada pode ser vista como mais vulnerável a manipulação ou menos transparente, o que pode ser um problema em contextos que exigem confiança pública ou fiscalização externa (Sizan *et al.* 2025).

Consortium Blockchain – Neste tipo de *blockchain*, várias organizações podem partilhar as responsabilidades de manutenção da mesma. Este tipo de *blockchain* permite partilhar dados e processos entre várias entidades de forma segura e controlada, mantendo a descentralização parcial. Cada utilizador pode validar transações, propor alterações ao protocolo e aceder aos dados conforme os níveis de permissão definidos em conjunto (Sizan *et al.* 2025).

Blockchain híbrida – A *blockchain* híbrida procura combinar elementos da *blockchain* pública e privada. Neste modelo, algumas informações e operações são acessíveis ao público, enquanto outras permanecem restritas e sob controlo privado.

Este tipo de acessibilidade e controlo é utilizado em setores onde é necessário garantir transparência numa parte do sistema, mas ao mesmo tempo proteger dados sensíveis ou garantir conformidade com regulamentações. Apesar de ser bastante flexível, a *blockchain* híbrida requer uma arquitetura mais complexa e uma implementação bem pensada para evitar conflitos entre a componente pública e privada (Sizan *et al.* 2025).

Na tabela 4.1, é feita uma comparação entre os diferentes tipos de *blockchain* comparados os seus pontos fortes e fracos bem como as suas vantagens e desvantagens.

Tabela 4.1 - Comparação entre os vários tipos de *blockchain*

Critério	<i>Blockchain Pública</i>	<i>Blockchain Privada</i>	<i>Consortium Blockchain</i>	<i>Blockchain Híbrida</i>
Acesso à rede	Aberta	Restrito a uma organização	Restrita a um grupo de organizações	Configurável
Descentralização	Total	Centralizada	Parcial	Parcial / Configurável
Velocidade de transações	Lenta	Rápida	Rápida	Média
Privacidade de dados	Nenhuma	Alta	Alta/Média	Alta
Custo energético	Alto	Baixo	Baixo	Variável
Administração	Comunidade aberta	Uma única entidade	Grupo de entidades com regras estipuladas	Configurável entre central e público
Fiabilidade	Baixa (<i>Trustless</i>)	Baseada na confiança na entidade gestora	Mútua entre membros selecionados	Combinada
Utilização	Criptomoedas, <i>WEB3, DAO's</i>	Gestão interna, auditorias e bases de dados	<i>Supply chain</i> , seguros e logística	Áreas de saúde, energia e rastreabilidade
Transparência	Total	Nenhuma	Parcial	Controlada

No contexto industrial, a *blockchain* do tipo consórcio (*consortium blockchain*) é frequentemente considerada a mais adequada. Isto deve-se ao facto de a indústria operar em ecossistemas onde diversas empresas, fornecedores e entidades reguladoras necessitam de colaborar de modo seguro e eficiente. A *blockchain* do tipo consórcio permite que apenas um grupo restrito de participantes previamente validados tenham acesso à rede, o que favorece uma colaboração controlada entre os intervenientes (Liu *et al.* 2022).

Este modelo oferece vantagens em termos de privacidade e desempenho. Como os nós participantes são conhecidos e limitados, o consenso é alcançado mais

rapidamente e com menor consumo energético, tornando a rede mais eficiente em ambientes industriais. Além disso, cada entidade acede exclusivamente à informação relevante para a sua atividade, garantindo a proteção de dados sensíveis como preços, volumes de produção ou contratos (Gad *et al.* 2022).

A administração partilhada, em que nenhuma entidade detém controlo absoluto, reforça a transparência e a confiança, sendo um fator essencial para assegurar a conformidade regulatória e a rastreabilidade em cadeias de abastecimento de setores regulados (Gad *et al.* 2022).

No entanto, existem situações em que outros modelos de *blockchain* podem ser mais adequados:

- Se a aplicação for restrita a uma única organização com foco na automação e eficiência interna, a *blockchain* privada pode ser preferível, dado o seu controlo centralizado e elevado desempenho (Azevedo *et al.* 2023).
- Quando há necessidade de fornecer transparência pública, como por exemplo permitir aos consumidores verificar a origem de um produto, mantendo confidenciais os dados operacionais, a *blockchain* híbrida representa uma solução equilibrada, combinando elementos públicos e privados (Liu *et al.* 2022).

4.1.4. Implementação da *blockchain* na cadeia de abastecimento

A colaboração na cadeia de abastecimento é um processo dinâmico e interdependente que envolve coordenação, partilha de informação e alinhamento estratégico entre fornecedores, fabricantes, distribuidores, revendedores, consumidores e operadores logísticos, fig. 4.3. O objetivo central é alcançar metas comuns de eficiência, resiliência e sustentabilidade, através da integração de recursos, dados e processos (Choi *et al.* 2018). Esta abordagem colaborativa tem vindo a ganhar destaque como resposta à crescente complexidade dos fluxos logísticos globais, que exige uma atuação sincronizada e um elevado grau de confiança entre parceiros (Ivanov, 2020).

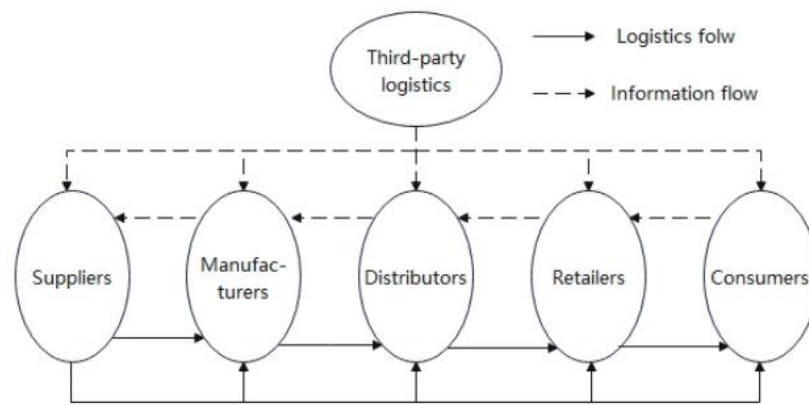


Figura 4.3 - Estrutura de uma cadeia de abastecimento (Liu *et al.* 2023)

A transformação digital tem sido apontada como um dos principais catalisadores desta evolução, permitindo uma gestão mais ágil, transparente e precisa das operações (Ivanov, 2020). A substituição de métodos manuais por sistemas tecnológicos tem reforçado a articulação entre os agentes da cadeia de abastecimento, promovendo uma maior coerência entre planejamento e execução. Nesse contexto, Seuring & Müller, 2018, destacam três pilares fundamentais para uma colaboração eficaz:

Três pilares são frequentemente destacados como essenciais para uma colaboração eficaz:

- Partilha de informação, que permite o alinhamento de processos e decisões;
- Sincronização de decisões, essencial para reações rápidas e coordenadas;
- Alinhamento de incentivos, que garante objetivos mutuamente benéficos entre os agentes da cadeia (Seuring & Müller, 2018).

Estes elementos são condicionados por fatores como confiança, compromisso e equilíbrio de poder, cuja presença se associa a melhores níveis de desempenho operacional e relacional entre os vários intervenientes, (Choi *et al.* 2018).

Kshetri, 2018, reforça esta perspetiva ao demonstrar, através de uma análise de múltiplos casos empresariais, que a tecnologia *blockchain* desempenha um papel central na promoção da confiança interorganizacional e na redução dos custos de transação. O autor identifica que as suas propriedades de transparência, imutabilidade e descentralização respondem diretamente a objetivos clássicos da gestão da cadeia de abastecimento, nomeadamente a redução de custos, aumento da qualidade, melhoria da velocidade, flexibilidade e sustentabilidade das operações.

Ao permitir que os intervenientes validem autonomamente transações e fluxos de informação, a *blockchain* diminui a dependência de intermediários e mitiga o risco de conflitos de dados, facilitando uma colaboração mais eficiente e confiável. Estes efeitos traduzem-se em maior coordenação entre parceiros, alinhamento de incentivos e melhoria da visibilidade ao longo de toda a cadeia logística (Kshetri, 2018).

De acordo com Saberi *et al.* 2018, a ausência de confiança e a assimetria de informação constituem barreiras estruturais à colaboração, frequentemente agravadas por limitações tecnológicas e pela fragmentação das cadeias globais. É precisamente neste enquadramento que a tecnologia *blockchain* surge como um instrumento facilitador da colaboração interorganizacional, ao permitir o registo imutável e distribuído de transações e eventos logísticos. As suas características técnicas como a imutabilidade, descentralização e rastreabilidade viabilizam um ambiente de confiança digital, em que as informações são partilhadas de forma segura e verificável entre diferentes agentes económicos.

Nos últimos anos, a tecnologia *blockchain* tem sido analisada enquanto instrumento com potencial para apoiar práticas colaborativas nas cadeias de abastecimento. As suas características técnicas como a imutabilidade dos registos, a descentralização e a rastreabilidade têm sido associadas a ganhos em transparência e segurança na troca de informação entre parceiros (Saberi *et al.* 2019).

A utilização de contratos inteligentes (*smart contracts*), conforme destacado por Kshetri, 2018, representa um avanço significativo na automação de acordos e processos logísticos, reduzindo custos de transação e eliminando intermediários. Paralelamente, Saberi *et al.* 2019, argumentam que o *blockchain* contribui para mitigar assimetrias de informação, pois os dados partilhados se tornam verificáveis e auditáveis, reduzindo o risco percebido e reforçando a confiança entre os parceiros.

Alguns estudos apontam ainda que a aplicação do *blockchain* pode contribuir para mitigar assimetrias de informação, consideradas barreiras frequentes à colaboração. Nestes contextos, a partilha de dados torna-se mais controlada e verificável, reduzindo o risco percebido por parte dos intervenientes (Saberi *et al.* 2019).

O crescimento da complexidade nas cadeias de abastecimento tem conduzido a um aumento da atenção dada à gestão da informação, à rastreabilidade e à confiança entre os intervenientes. A tecnologia *blockchain* tem sido estudada como uma das possíveis respostas a estas necessidades, fig. 4.4, devido à sua arquitetura distribuída e ao seu potencial para registos invioláveis de transações (Sabeti *et al.* 2019).

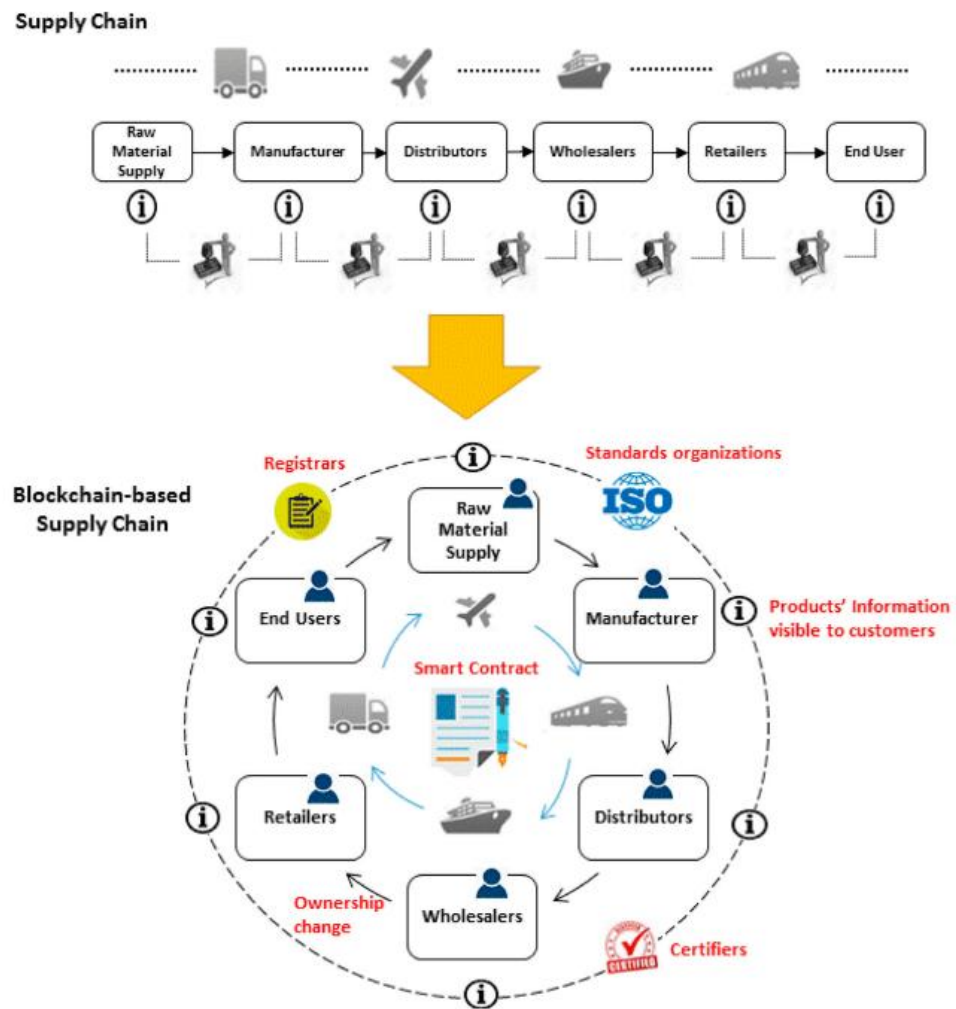


Figura 4.4 - Transformação da cadeia de abastecimento (Sabeti *et al.* 2019)

Na literatura, são identificados diversos benefícios associados à aplicação do *blockchain* neste contexto:

- Melhoria da rastreabilidade, permitindo identificar a origem e o percurso de produtos ao longo da cadeia;
- Redução de custos operacionais, através da eliminação de processos redundantes ou intermediários;

- Segurança da informação, baseada em criptografia e consenso descentralizado;
- Automatização de tarefas através da execução de contratos inteligentes (*smart contracts*) (Kshetri, 2018).

A integração do *blockchain* com outras tecnologias, como a Internet das Coisas (*IoT*), tem sido explorada como forma de potencializar o controle em tempo real de parâmetros logísticos, nomeadamente em setores com exigências específicas, como o farmacêutico ou o agroalimentar (Saberri *et al.* 2019).

Estudos indicam que a tecnologia pode ilustrar diferentes formas de implementação. Um deles, onde se analisam práticas relacionadas com a visibilidade dos fluxos e o intercâmbio de dados entre os vários intervenientes da cadeia de abastecimento, procurando o uso da *blockchain* na simplificação da partilha de informação entre fornecedores e operadores, bem como a sua associação à rastreabilidade e ao registo de eventos logísticos (Liu *et al.* 2023).

A literatura aponta também limitações à adoção desta tecnologia, nomeadamente no que diz respeito à necessidade de padronização, à escalabilidade das soluções e à cooperação entre múltiplos *stakeholders*. Estes aspetos têm sido referidos como obstáculos ao alargamento do uso do *blockchain* a diferentes setores industriais (Kshetri, 2018).

4.1.5. Fundamentos da *blockchain*

A tecnologia *blockchain* constitui um dos pilares da transformação digital, sendo amplamente reconhecida como um sistema descentralizado de registo digital concebido para assegurar transparência, integridade e rastreabilidade na gestão de dados e transações. Segundo Sizan *et al.* 2025, os fundamentos da *blockchain* correspondem aos princípios essenciais que sustentam o seu funcionamento e a sua arquitetura distribuída, formando a base sobre a qual se desenvolvem os diversos sistemas e aplicações baseados nesta tecnologia. De acordo com Kshetri, 2018, compreender esses princípios é fundamental para avaliar o papel da *blockchain* no alcance dos objetivos estratégicos da gestão da cadeia de abastecimento, tais como redução de custos, aumento da qualidade, velocidade, confiabilidade, sustentabilidade e flexibilidade operacional.

Registro distribuído (*Distributed Ledger*) – A *blockchain* opera como um livro-razão digital descentralizado, no qual as transações são registradas de forma distribuída por uma rede de computadores, designados por nós. Cada nó armazena uma cópia integral da cadeia de blocos, garantindo transparência, redundância e resiliência do sistema. Esta característica elimina a necessidade de uma autoridade central, assegurando a integridade e a rastreabilidade dos dados partilhados (Kshetri, 2018).

Registos imutáveis (*Immutable Records*) – Após registada, uma transação torna-se virtualmente impossível de alterar ou eliminar, uma vez que cada bloco está criptograficamente ligado ao anterior, formando uma cadeia contínua e verificável. A imutabilidade dos registos reforça a confiança e a segurança dos dados, aspetos essenciais em contextos de colaboração interorganizacional e em cadeias de abastecimento globais (Saber *et al.* 2019).

Mecanismo de consenso (*Consensus Mechanism*) – A validação das transações é assegurada por algoritmos de consenso, que substituem a necessidade de uma entidade central. Estes algoritmos como *Proof of Work (PoW)*, *Proof of Stake (PoS)*, *Proof of Authority (PoA)* e *Delegated Proof of Stake (DPoS)* garantem que todos os participantes concordem quanto ao estado atual da *blockchain*, promovendo confiança coletiva, coerência e integridade do sistema (Sizan *et al.* 2025).

Criptografia (*Cryptography*) – A segurança das transações e das informações é sustentada por técnicas criptográficas como funções *hash*, assinaturas digitais e criptografia de chave pública/privada. Estes mecanismos garantem a autenticidade e integridade dos dados, protegendo a rede contra manipulações e acessos não autorizados (Kshetri, 2018).

Contratos inteligentes (*Smart Contracts*) – Representam programas autoexecutáveis que automatizam acordos previamente definidos entre as partes com base em condições lógicas (“se-então”). Estes contratos eliminam intermediários, assegurando transparência, rapidez e confiança nas transações. A sua aplicação é transversal a vários setores como as finanças, logística, saúde e fabrico, permitindo ganhos substanciais de eficiência (Sizan *et al.* 2025) (Kshetri, 2018).

Descentralização (*Decentralization*) – A *blockchain* distingue-se pela sua estrutura descentralizada, que distribui o controlo e a validação das transações entre os participantes da rede. Esta característica aumenta a resiliência e a segurança do sistema, evitando pontos únicos de falha e reduzindo o risco de manipulações centralizadas (Saberri *et al.* 2019).

Transparência e privacidade (*Transparency and Privacy*) – A tecnologia proporciona um equilíbrio entre transparência e confidencialidade. Todas as transações podem ser auditadas por utilizadores autorizados, enquanto os dados sensíveis permanecem protegidos através de mecanismos criptográficos que asseguram anonimato seletivo e privacidade (Sizan *et al.*, 2025).

Tokenização (*Tokenization*) – A *blockchain* possibilita a criação e gestão de ativos digitais (*tokens*), que podem representar bens tangíveis (como matérias-primas, produtos acabados ou certificados) ou intangíveis (como direitos de propriedade intelectual e criptomoedas). Este processo permite uma transferência segura, rastreável e verificável de propriedade, ampliando o potencial de digitalização de ativos nas cadeias de abastecimento (Kshetri, 2018).

De acordo com Kshetri, 2018, os fundamentos técnicos e estruturais da *blockchain* não devem ser compreendidos apenas como componentes tecnológicos isolados, mas como vetores estratégicos de transformação organizacional. A descentralização, a transparência e a imutabilidade proporcionam uma infraestrutura capaz de sustentar relações de confiança e rastreabilidade entre os diferentes intervenientes de uma cadeia de valor. Estes princípios traduzem-se em benefícios tangíveis para a engenharia, nomeadamente a redução de custos de coordenação, a melhoria da eficiência operacional e o reforço da sustentabilidade e conformidade.

Compreendidos estes fundamentos, tornou-se essencial analisar como se materializam na prática industrial, isto é, de que forma são aplicados em setores específicos como a logística, a energia, o setor alimentar ou a indústria farmacêutica. Assim, o subcapítulo seguinte examina as principais aplicações do *blockchain* em contextos produtivos, evidenciando o seu impacto na eficiência, rastreabilidade e sustentabilidade dos sistemas industriais contemporâneos.

4.2. Aplicações industriais da *blockchain*

4.2.1. *Blockchain* na cadeia de abastecimento

A análise conduzida por Wang *et al.*, 2018, revelou que a *blockchain* gera valor para as cadeias de abastecimento em quatro dimensões principais: visibilidade e rastreabilidade alargada, digitalização e desintermediação, reforço da segurança da informação e utilização de contratos inteligentes. A rastreabilidade, por exemplo, é identificada como um dos domínios mais promissores, ao permitir registar de forma imutável todas as etapas do ciclo de vida de um produto. Este contributo é consistente com outros estudos, como o de Saberi *et al.*, 2019, que também destacam a importância da transparência e da confiança em cadeias complexas e globais. No entanto, enquanto Saberi *et al.*, 2019, enfatiza sobretudo os benefícios para a sustentabilidade e a circularidade, Wang *et al.*, 2018, oferecem uma perspetiva mais ampla, sublinhando igualmente o impacto da *blockchain* na desintermediação de processos e na redução da dependência de terceiros, algo particularmente relevante no comércio internacional e nas operações logísticas internacionais.

No que diz respeito à segurança da informação, Wang *et al.*, 2018, realçam a capacidade da *blockchain* em mitigar riscos de manipulação e ataques cibernéticos graças à sua arquitetura descentralizada. Este ponto aborda diretamente com as contribuições de Kshetri, 2018, que explora a forma como a *blockchain* pode reduzir assimetrias de informação e combater práticas fraudulentas em mercados emergentes. Já a questão dos contratos inteligentes é analisada por Wang *et al.*, 2018 como um elemento transformador, capaz de automatizar processos de auditoria, controlo de qualidade e pagamentos, reduzindo custos e erros humanos. Esta visão complementa os contributos de Liu e Zhang, 2023, que destacam a integração da *blockchain* com a *Internet of Things (IoT)* como meio para alcançar um maior nível de eficiência operacional em cadeias industriais.

Apesar do potencial identificado, os autores também salientam diversas barreiras que ainda limitam a difusão da tecnologia. Entre elas, destacam-se as limitações de escalabilidade e desempenho, a falta de interoperabilidade entre plataformas, os custos de implementação e manutenção, bem como as incertezas

legais e regulatórias associadas ao uso internacional da tecnologia. Estas preocupações alinham-se com outras análises recentes que apontam para a dificuldade de transpor os resultados de projetos piloto para implementações em larga escala. Além disso, Wang *et al.*, 2018 chamam a atenção para a resistência organizacional e para os desafios de tomada de decisão, aspetos que muitas vezes não são suficientemente explorados em estudos mais técnicos, mas que se revelam fundamentais quando se trata da adoção em cadeias globais.

Como forma de ultrapassar estas limitações, o artigo apresenta uma agenda de investigação futura que continua a ser atual e pertinente. Entre os principais tópicos sugeridos destacam-se o desenvolvimento de modelos de tomada de decisão adaptados a ecossistemas baseados em *blockchain*, a necessidade de estudos empíricos robustos que demonstrem o impacto real para além dos casos piloto, a integração da *blockchain* com tecnologias digitais complementares como a *IoT* e o *big data*, e a avaliação das implicações sociais e económicas da sua adoção, nomeadamente em áreas como ética, sustentabilidade e impacto laboral. Este último ponto liga-se diretamente ao trabalho de Saberi *et al.*, 2019, que evidenciam a relevância da *blockchain* na promoção de cadeias mais sustentáveis e resilientes.

A sistematização apresentada pelos autores fornece uma visão transversal que permite compreender de forma integrada os drivers de adoção, as áreas de maior valor, os desafios e as linhas de investigação futura. A síntese das perguntas e respetivas respostas encontra-se apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 4.2 - Questões e respostas da Revisão Sistemática. (Wang *et al.*, 2018)

Questão de Investigação/Objetivo	Resposta
RQ1 - Como a tecnologia <i>blockchain</i> influenciará as práticas e políticas das cadeias de abastecimento futuras?	O estudo conclui que a <i>blockchain</i> está a transformar as cadeias de abastecimento através da descentralização, rastreabilidade e transparência. A confiança é o principal fator que impulsiona a adoção, e a tecnologia redefine as relações entre parceiros e o modo como a informação é partilhada e validada.

RO1 - Identificar os fatores que impulsionam a implementação da <i>blockchain</i> nas cadeias de abastecimento.	Os principais fatores motivadores são a necessidade de confiança, transparência, rastreabilidade, redução de fraudes, eficiência operacional e integração digital entre <i>stakeholders</i> . A pressão por conformidade e sustentabilidade também é um catalisador relevante.
RO2 - Identificar as áreas em que a <i>blockchain</i> cria maior valor na gestão da cadeia de abastecimento.	As áreas de maior valor incluem gestão de contratos inteligentes, digitalização e desintermediação de processos, segurança de dados, proveniência de produtos, logística, financiamento comercial e gestão documental. A integração com <i>IoT</i> reforça o controle em tempo real.
RO3 - Investigar os desafios e barreiras à difusão da <i>blockchain</i> nas cadeias de abastecimento.	As barreiras incluem imaturidade tecnológica, falta de normalização, custos elevados, preocupações com privacidade e administração, baixa escalabilidade e ausência de evidência empírica robusta. A resistência organizacional e a ausência de competências também dificultam a adoção.
RO4 - Desenvolver elementos de uma agenda de investigação futura para a <i>blockchain</i> nas cadeias de abastecimento.	Os autores propõem uma agenda de investigação centrada em modelos de administração colaborativa, métricas de desempenho, impacto social e ambiental, interoperabilidade tecnológica e avaliação económica do retorno da adoção da <i>blockchain</i> . Destacam ainda a necessidade de estudos empíricos e comparativos em diferentes setores.

A análise de Wang *et al.*, 2018, evidencia que, apesar de a *blockchain* ainda se encontrar numa fase inicial de adoção nas cadeias de abastecimento, já existe uma estrutura conceptual sólida que permite procurar os benefícios e desafios da sua aplicação na indústria. A identificação de *drivers*, áreas de valor, barreiras e agendas de investigação futura continua a ser pertinente e confirma-se na literatura mais recente. No entanto, os avanços registados nos últimos anos mostram que algumas das barreiras apontadas, como a escalabilidade e a interoperabilidade, permanecem em aberto, enquanto novas dimensões, como a sustentabilidade e a integração com tecnologias digitais emergentes, ganham cada vez maior relevância.

Reddy *et al.*, 2021, desenvolveram uma revisão sistemática centrada na aplicação da tecnologia *blockchain* na cadeia de abastecimento automóvel,

propondo um modelo conceptual de integração digital entre fabricantes, fornecedores, distribuidores e operadores logísticos. Os autores descrevem que a indústria automóvel atua num ambiente *VUCA* (volátil, incerto, complexo e ambíguo), no qual a adoção de tecnologias emergentes como Internet das Coisas (*IoT*), Inteligência Artificial e *blockchain* se torna essencial para garantir resiliência, rastreabilidade e transparência nas operações. A *blockchain* é destacada como um mecanismo de confiança distribuída, capaz de eliminar redundâncias, melhorar a partilha de informação e reduzir os atrasos associados aos sistemas tradicionais centralizados.

A implementação da *blockchain*, segundo Reddy *et al.*, 2021, permite uma coordenação digital entre *stakeholders*, melhorando a eficiência e reduzindo custos através da automação de processos com contratos inteligentes. Estes contratos asseguram a execução automática de transações, pagamentos e verificações de qualidade, reduzindo falhas humanas e aumentando a fiabilidade dos fluxos logísticos. A integração da *blockchain* com o *Industrial Internet of Things (IIoT)* possibilita o acompanhamento em tempo real de peças e componentes, promovendo visibilidade total e rastreabilidade ao longo de todo o ciclo de vida automóvel.

O artigo identifica como principais benefícios:

- I. Redução de custos administrativos e operacionais;
- II. Maior transparência entre parceiros comerciais;
- III. Rastreabilidade precisa de peças e matérias-primas;
- IV. Resposta mais rápida a falhas ou campanhas de “recall”.

Reddy *et al.*, 2021, propõem ainda um *framework* de implementação em três camadas:

- I. Integração de dados e processos da cadeia de abastecimento;
- II. Utilização de plataformas credenciadas (como a *Hyperledger Fabric*) para assegurar privacidade e desempenho;
- III. Monitorização de desempenho e sustentabilidade, alinhando objetivos operacionais com metas ambientais.

Este modelo evidencia como a *blockchain* pode reforçar a sustentabilidade, a eficiência e a confiança na cadeia automóvel, integrando-se como um pilar tecnológico da Indústria 4.0. A experiência do setor automóvel mostra ainda que a

adoção de soluções *blockchain* requer colaboração multilateral e interoperabilidade entre sistemas, desafios também presentes noutros setores logísticos e de transporte. Nesse sentido, a análise de Reddy *et al.*, 2021, estabelece um elo de continuidade com a aplicação da tecnologia em contextos de logística global e transporte marítimo, explorados na secção seguinte.

4.2.2. *Blockchain na logística e transporte marítimo*

O transporte marítimo constitui uma grande parte do comércio internacional, movimentando a maioria dos fluxos de mercadorias globais. Contudo, apesar da sua importância estratégica, o setor permanece marcado por processos altamente burocráticos, dependentes de documentação em papel e com reduzida integração digital. Esta realidade traduz-se em ineficiências operacionais, custos elevados e riscos associados à falta de transparência (Jovanovic *et al.* 2022).

Foi neste enquadramento que surgiu a plataforma *TradeLens*, desenvolvida em 2018 pela *IBM* em parceria com a *Maersk*, com o objetivo de modernizar e digitalizar os fluxos logísticos do transporte marítimo. O *TradeLens* é uma plataforma digital baseada em *blockchain* privada (*Hyperledger Fabric*) que permite aos diferentes participantes da cadeia de abastecimento, transportadores, portos, terminais, transitários e operadores logísticos partilhar informação de forma segura, transparente e imutável. O sistema disponibiliza um registo partilhado de eventos e documentos críticos, criando assim uma fonte única de verdade acessível a todos os intervenientes autorizados (Jovanovic *et al.* 2022).

A lógica subjacente ao *TradeLens* é a de que uma infraestrutura digital partilhada pode reduzir a fragmentação entre sistemas, eliminar redundâncias e criar maior visibilidade ao longo de toda a cadeia de transporte. Para além de digitalizar processos manuais, a plataforma visa aumentar a confiança entre parceiros comerciais e abrir espaço para novos serviços digitais desenvolvidos sobre os dados agregados. Deste modo, o *TradeLens* posiciona-se não apenas como uma ferramenta tecnológica, mas como um ecossistema colaborativo de logística global (Jovanovic *et al.* 2022).

O setor do transporte marítimo, fundamental para o comércio internacional, caracteriza-se por uma elevada complexidade de processos e pela participação de

múltiplos intervenientes. A existência de fluxos documentais redundantes, sistemas heterogêneos e grande dependência de registos manuais resulta em elevados custos de transação e ineficiências operacionais (Jovanovic *et al.* 2022). Neste contexto, a plataforma *TradeLens*, foi concebida para responder a estes desafios através da utilização da tecnologia *blockchain* como suporte a um sistema de informação partilhado, transparente e imutável.

A principal contribuição da plataforma reside na digitalização e automatização dos fluxos de informação logísticos, eliminando barreiras entre os diferentes participantes da cadeia e assegurando uma visão integrada de início ao fim do processo de transporte. Para operadores portuários, transportadores e órgãos fiscais, tal traduz-se numa maior visibilidade operacional, com atualização quase em tempo real dos eventos relacionados com a carga (Jovanovic *et al.* 2022). Do ponto de vista da engenharia, este aspeto está diretamente ligado à redução de variabilidade nos processos, diminuição de tempos de espera e eliminação de atividades que não geram valor.

A arquitetura técnica do *TradeLens* baseia-se numa rede privada construída sobre o *Hyperledger Fabric*, que garante confidencialidade seletiva e controlo descentralizado dos dados. Tal escolha tecnológica está associada a requisitos específicos do setor logístico: necessidade de escalabilidade, robustez contra manipulação de registos e, simultaneamente, proteção de informações comerciais sensíveis (Jovanovic *et al.* 2022). Esta dimensão de tomada de decisão tecnológica é central em contextos industriais, pois afeta diretamente a interoperabilidade entre sistemas e a integração com infraestruturas já existentes.

Contudo, a implementação da plataforma demonstrou que a *blockchain*, por si só, não elimina todas as barreiras. Persistem desafios de cooperação entre empresas concorrentes, que dificultam a obtenção de efeitos de rede, bem como problemas de interoperabilidade com sistemas anteriores ainda fortemente enraizados no setor (Jovanovic *et al.* 2022). Do ponto de vista da gestão de operações, isto evidencia que a introdução de tecnologias disruptivas requer não apenas soluções técnicas, mas também ajustes organizacionais e institucionais.

Comparando este caso com aplicações em setores como a indústria alimentar, (Casado-Vara *et al.* 2018) (Rogerson & Parry, 2020), nota-se uma diferença de foco. Enquanto no setor alimentar a *blockchain* é usada sobretudo para

rastreabilidade e garantia de qualidade do produto, no transporte marítimo o objetivo é essencialmente eficiência operacional e integração de processos logísticos. Ambos os casos demonstram, no entanto, que a *blockchain* se apresenta como um sistema de suporte à decisão e coordenação de fluxos complexos, contribuindo para maior previsibilidade e controlo em cadeias de abastecimento globais.

A *TradeLens* mostra como a *blockchain* pode ser aplicada no transporte marítimo como infraestrutura de informação partilhada, capaz de reduzir custos, aumentar a visibilidade e melhorar a coordenação entre múltiplos intervenientes. Contudo, o estudo também confirma que o seu sucesso depende da capacidade de articular a solução tecnológica com mecanismos de cooperação interorganizacional, interoperabilidade técnica e adoção setorial.

4.2.3. Blockchain na cadeia alimentar: confiança, rastreabilidade e economia circular

As cadeias agroalimentares apresentam características de elevada complexidade, resultado da multiplicidade de agentes envolvidos, produtores, distribuidores, revendedores, certificadoras e entidades reguladoras. Havendo a necessidade de garantir simultaneamente segurança, qualidade e rastreabilidade. Trata-se de um setor onde a variabilidade dos processos, a validade dos produtos e a fragmentação dos sistemas de informação representam desafios estruturais.

Neste contexto, a *blockchain* tem sido estudada como solução para aumentar a eficiência e transparência na gestão da cadeia. Casado-Vara *et al.*, 2018, propõem um modelo com base na *blockchain* em combinação com sistemas multiagente, no qual os contratos inteligentes são utilizados para automatizar a partilha de informação e reduzir a necessidade de intermediários. O impacto direto dessa abordagem traduz-se em redução de redundâncias, melhoria da rastreabilidade e maior sincronização de fluxos. Para além disso, ao criar um registo imutável de cada transação, a tecnologia atua como um mecanismo de controlo de qualidade distribuído, fundamental para mitigar riscos de fraude ou adulteração de produtos alimentares.

Rogerson e Parry, 2020, através de estudos empíricos, complementam esta visão ao mostrar que a *blockchain* proporciona maior visibilidade e confiança entre os diferentes agentes da cadeia alimentar. Do ponto de vista operacional, a rastreabilidade em tempo quase real permite reduzir tempos de resposta em situações de *recall* de produtos, minimizar desperdícios e reforçar a fiabilidade dos sistemas de planeamento. Estes benefícios alinham-se diretamente com princípios da engenharia de produção, nomeadamente a redução de variabilidade e o aumento da previsibilidade nos processos.

No entanto, os mesmos autores alertam para limitações práticas que impedem a adoção plena da tecnologia. Entre as principais barreiras encontram-se, a dependência da qualidade dos dados inseridos no sistema, já que a imutabilidade da *blockchain* não corrige erros humanos na fase de registo, os custos de implementação e integração com sistemas legados, que dificultam a adoção em empresas de menor dimensão e a aceitação limitada por parte de consumidores e retalhistas, que podem não valorizar ou não estar dispostos a suportar os custos acrescidos associados à utilização da tecnologia (Rogerson & Parry, 2020).

Comparando estas conclusões com os resultados de Zhao *et al.* 2019, que realizaram uma revisão sistemática da aplicação da *blockchain* em cadeias agroalimentares, observa-se uma convergência clara, todos os trabalhos destacam os ganhos em rastreabilidade e confiança, mas também identificam barreiras significativas de escalabilidade, custos e regulamentação. Enquanto Casado-Vara *et al.* 2018 e Rogerson e Parry, 2020, enfatizam casos concretos e barreiras operacionais, Zhao *et al.* 2019, ampliam a perspetiva ao apontar que a *blockchain* só atingirá maturidade neste setor se for integrada com tecnologias complementares, como *IoT* (sensores para recolha automática de dados), *big data* (análise em larga escala) e inteligência artificial (apoio à decisão).

Assim, neste contexto, a *blockchain* na cadeia alimentar deve ser entendida como uma infraestrutura de informação que suporta a coordenação de fluxos complexos, com impacto direto na redução de desperdício, aumento da rastreabilidade e melhoria do controlo de qualidade. No entanto, a sua implementação exige a articulação com sistemas de recolha de dados fiáveis e a superação de barreiras económicas e regulatórias.

É possível se verificar que a *blockchain* representa uma ferramenta promissora para melhorar a eficiência das cadeias agroalimentares e responder às exigências crescentes de segurança e sustentabilidade. Contudo, o seu impacto real só se materializa quando complementado por sistemas de informação integrados, tecnologias digitais convergentes e políticas de suporte que reduzam as barreiras de adoção.

4.2.4. Indústria têxtil: rastreabilidade ética e sustentabilidade social

A indústria têxtil e de vestuário caracteriza-se por cadeias de abastecimento longas, fragmentadas e altamente globalizadas, nas quais matérias-primas, processos de transformação e etapas de distribuição frequentemente atravessam múltiplos países. Esta configuração torna o setor particularmente vulnerável a problemas de opacidade, contrafação, utilização de mão de obra precária e dificuldades na verificação de conformidade ambiental e social. Trata-se de um setor onde a rastreabilidade dos fluxos de materiais é crítica para garantir controlo de qualidade, eficiência logística e conformidade regulatória.

O estudo de Agrawal *et al.*, 2021, apresenta um *framework* de rastreabilidade com base na *blockchain* aplicado ao algodão orgânico, demonstrando como a tecnologia pode ser utilizada para monitorizar cada transação ao longo da cadeia de valor. A utilização de contratos inteligentes permite automatizar verificações de conformidade e garantir que os registos são imutáveis e auditáveis. Este tipo de abordagem assegura que os diferentes intervenientes, desde agricultores até revendedores têm acesso a uma fonte comum de informação fidedigna, reduzindo riscos de fraude e melhorando a eficiência dos processos de certificação.

Do ponto de vista operacional, a adoção da *blockchain* na indústria têxtil traduz-se em benefícios como:

- Redução da variabilidade associada a dados inconsistentes sobre a origem de matérias-primas.
- Diminuição de lead times nos processos de auditoria e certificação.
- Aumento da previsibilidade na gestão de inventários, dado que os registos em tempo quase real permitem planeamento mais fiável.

Comparando com o setor alimentar, Casado-Vara *et al.*, 2018 e Rogerson & Parry, 2020, observa-se que a motivação para adoção é distinta. Enquanto na cadeia alimentar a *blockchain* responde principalmente a exigências de segurança alimentar e gestão de risco, no setor têxtil a prioridade recai sobre a ética e a sustentabilidade ambiental. Contudo, em ambos os setores, a tecnologia atua como sistema de informação integrado que reduz falhas de coordenação e aumenta a confiança entre parceiros.

Apesar das vantagens, Agrawal *et al.*, 2021, reconhecem barreiras significativas à adoção. Entre elas, destacam-se:

- Custos de implementação, especialmente elevados para pequenas e médias empresas (PME).
- Complexidade técnica, relacionada com a integração entre *blockchain* e sistemas de gestão de operações já existentes (*ERP*, *MES*).
- Escassez de competências especializadas, que limita a capacidade de internalizar o desenvolvimento e manutenção de soluções.

Estas barreiras remetem para uma realidade comum a outros setores industriais: a *blockchain* não pode ser implementada isoladamente, devendo ser articulada com sistemas de informação já existentes e com políticas institucionais que facilitem a adoção (Agrawal *et al.*, 2021).

A aplicação da *blockchain* na indústria têxtil demonstra como esta tecnologia pode ser usada não apenas como ferramenta de eficiência operacional, mas também como instrumento de legitimidade social e ambiental. No contexto da engenharia de produção, a sua relevância está em permitir maior rastreabilidade de fluxos materiais, melhoria de processos de auditoria e apoio à gestão sustentável da cadeia de abastecimento. Contudo, a sua difusão em larga escala dependerá da capacidade de superar barreiras económicas e técnicas, bem como da integração com outras tecnologias digitais de suporte à Indústria 4.0.

4.2.5. Retalho e mobiliário

O setor do retalho global enfrenta desafios crescentes relacionados com a gestão de cadeias de abastecimento complexas, pressão por transparência e necessidade de integração digital de processos logísticos. Neste contexto, a empresa

IKEA surge como um caso relevante de exploração da tecnologia *blockchain* para reforçar a eficiência e a rastreabilidade nas suas operações internacionais.

O estudo de Sund *et al.* 2020, analisa a implementação de uma solução *blockchain* privada, baseada na rede *Quorum*, para o registo de eventos logísticos no ciclo de vida dos produtos da *IKEA*. O objetivo principal da aplicação foi criar uma infraestrutura digital confiável para documentar e monitorizar cada transação de transporte e movimentação de mercadorias, permitindo que todos os parceiros envolvidos tivessem acesso a informação validada e resistente a manipulações.

Segundo Sund *et al.* 2020, esta abordagem tem implicações diretas em três dimensões centrais:

- Fiabilidade dos dados – a imutabilidade dos registos elimina discrepâncias entre sistemas e reduz a variabilidade associada a erros de comunicação.
- Rastreabilidade de processos – o acompanhamento em tempo quase real permite maior controlo operacional e capacidade de resposta em situações de desvio ou atraso.
- Integração da cadeia de valor – a partilha de informação num sistema comum diminui redundâncias e apoia o planeamento conjunto.

No entanto, Sund *et al.*, 2020, também identificam limitações técnicas relevantes. A solução enfrentou problemas de escalabilidade, com desempenho comprometido à medida que o volume de transações aumentava. Além disso, surgiram questões relacionadas com a privacidade dos dados, dado que, mesmo em redes privadas, a partilha de informação sensível entre diferentes parceiros exige mecanismos de controlo mais detalhado.

Comparando este caso com a experiência do *TradeLens*, Jovanovic *et al.*, 2022, é possível observar diferenças relevantes no alcance e no modelo de implementação. Enquanto o *TradeLens* foi concebido como uma plataforma global multifacetada, envolvendo concorrentes diretos e entidades reguladoras, a iniciativa da *IKEA* teve uma configuração mais interna e controlada, focada em integrar processos dentro da sua própria cadeia de valor. Assim, enquanto o *TradeLens* enfrentou barreiras institucionais e de cooperação entre concorrentes, a *IKEA* lidou sobretudo com desafios técnicos de escalabilidade e integração tecnológica.

Apesar dessas limitações, o caso *IKEA* reforça a ideia de que a *blockchain* pode ser aplicada como infraestrutura de suporte à rastreabilidade e coordenação de fluxos logísticos, especialmente em redes complexas e distribuídas. A relevância desta aplicação reside na melhoria da qualidade da informação, no apoio ao planejamento de operações e no controle de processos críticos.

Através deste caso de estudo da *IKEA* demonstra que a *blockchain* pode apresentar ganhos tangíveis na gestão de cadeias de abastecimento do retalho e do mobiliário, mas também evidencia que o seu impacto depende da capacidade de resolver limitações técnicas e de promover a integração com sistemas de gestão já existentes. Este caso confirma que a adoção da tecnologia, mesmo em grandes multinacionais, ainda se encontra numa fase de experimentação e aprendizagem, mas aponta um caminho claro para a construção de cadeias mais transparentes, ágeis e resilientes.

4.2.6. Perspetivas internacionais: maturidade em contraste com a dependência institucional

A adoção da tecnologia *blockchain* nas cadeias de abastecimento não ocorre de modo uniforme entre países ou regiões. Fatores como infraestrutura tecnológica, maturidade digital, quadro regulatório e políticas de inovação influenciam fortemente a forma como as empresas integram esta tecnologia nos seus sistemas produtivos e logísticos. O estudo comparativo de Teodorescu e Korchagina, 2021, fornece uma análise relevante sobre estas diferenças, contrastando a realidade da Alemanha, enquanto economia industrial altamente digitalizada, com a da Rússia, caracterizada por um ecossistema tecnológico ainda em consolidação.

Na Alemanha, a adoção da *blockchain* é impulsionada por um ambiente empresarial maduro e por políticas industriais consistentes com a estratégia da Indústria 4.0, que promovem a digitalização integrada de cadeias de valor. As empresas alemãs tendem a internalizar as competências necessárias, desenvolvendo soluções próprias e integrando a *blockchain* com sistemas ERP e tecnologias complementares, como *IoT* e inteligência artificial (Teodorescu & Korchagina, 2021). Esta abordagem reflete um modelo de inovação orientado para a eficiência e otimização de processos produtivos, no qual a *blockchain* é vista como uma

ferramenta para reforçar a rastreabilidade, garantir a qualidade e reduzir ineficiências nas operações industriais.

Por outro lado, na Rússia, o estudo mostra uma realidade bastante diferente. As iniciativas de *blockchain* são, em grande parte, impulsionadas por parcerias externas e pelo apoio do Estado, em vez de surgir de forma espontânea no setor privado. As empresas russas revelam menor capacidade para internalizar o conhecimento técnico e dependem frequentemente de empresas de tecnologia estrangeiras ou locais especializadas para o desenvolvimento das soluções. Além disso, a ausência de um enquadramento regulatório estável e de políticas industriais orientadas para a digitalização dificulta a escalabilidade dos projetos (Teodorescu & Korchagina, 2021).

Do ponto de vista do trabalho, estas diferenças têm implicações diretas na maturidade operacional e na capacidade de integração tecnológica. Nos ambientes mais desenvolvidos, como o alemão, a *blockchain* é incorporada em sistemas de gestão de operações de forma incremental, promovendo automação, rastreabilidade e controlo de desempenho. Já em contextos menos maduros, a implementação tende a ser pontual e experimental, centrada em provas de conceito (*proof of concept*), com impacto limitado na eficiência global da cadeia de valor (Teodorescu & Korchagina, 2021).

Ao comparar este cenário com os casos setoriais analisados anteriormente como o *TradeLens* no transporte marítimo (Jovanovic *et al.*, 2022) ou a IKEA no comércio a retalho (Sund *et al.* 2020), é possível observar que os projetos de maior sucesso são aqueles inseridos em ecossistemas tecnológicos consolidados e com elevado grau de cooperação interorganizacional. Isto reforça a ideia de que a adoção da *blockchain* é tanto uma questão tecnológica quanto institucional: a tecnologia só gera valor sustentável quando apoiada por políticas públicas coerentes, padronização de processos e capacitação técnica.

Foi possível concluir através da análise de Teodorescu e Korchagina, 2021, que a evolução da *blockchain* segue trajetórias distintas em função da maturidade tecnológica e institucional dos países. Economias avançadas tendem a adotar a tecnologia de forma integrada e orientada para ganhos de eficiência operacional, enquanto economias emergentes dependem mais de políticas estatais e de parcerias externas. Esta diferenciação mostra que o sucesso da *blockchain* não depende

apenas do potencial técnico, mas também da capacidade de construir infraestruturas organizacionais e regulatórias compatíveis com a sua complexidade.

4.2.7. Análise e comparação dos diferentes artigos e casos de estudo

Os estudos de Pournader *et al.*, 2019 e Zhao *et al.*, 2019, oferecem uma visão abrangente das tendências, benefícios e limitações identificadas na literatura até ao momento, constituindo uma base de referência para a avaliação crítica do estado da arte no domínio da engenharia.

De acordo com Pournader *et al.*, 2019, a investigação sobre *blockchain* em cadeias de abastecimento pode ser organizada em quatro grandes eixos temáticos:

- I. Tecnologia e integração de sistemas;
- II. Confiança e segurança da informação;
- III. Comércio e contratos inteligentes;
- IV. Rastreabilidade e transparência.

Estes eixos refletem a natureza multidimensional da tecnologia, que atua simultaneamente como infraestrutura técnica, mecanismo de coordenação e instrumento de tomada de decisão. Para os autores, o valor da *blockchain* não reside apenas na imutabilidade dos registos, mas na capacidade de criar sistemas descentralizados de controlo e verificação, aplicáveis tanto em processos industriais como em redes logísticas complexas.

Zhao *et al.*, 2019, focando-se especificamente nas cadeias agroalimentares, reforçam muitos dos pontos levantados por Pournader *et al.*, 2019, mas acrescentam uma dimensão prática ao sublinhar os desafios de implementação em ambientes de produção real. A sua revisão mostra que, embora os benefícios potenciais da *blockchain* sejam amplamente reconhecidos, incluindo melhoria da rastreabilidade, aumento da confiança, redução de fraudes e otimização da coordenação entre parceiros, a maioria dos estudos empíricos encontra-se ainda em fase experimental ou de prova de conceito. Assim, a maturidade da tecnologia no contexto industrial é considerada baixa, e a sua adoção generalizada depende de avanços técnicos e organizacionais.

Ambos os trabalhos identificam também um conjunto de barreiras transversais à implementação, que incluem:

- I. Escalabilidade e desempenho, limitados pela capacidade de processamento das redes *blockchain* atuais.
- II. Custos de implementação e manutenção, especialmente significativos para pequenas e médias empresas.
- III. Ausência de regulamentação e padrões internacionais, o que dificulta a interoperabilidade entre diferentes plataformas.
- IV. Desafios humanos e organizacionais, relacionados com resistência à mudança e falta de competências técnicas (Pournader *et al.*, 2019) (Zhao *et al.*, 2019).

Estas revisões são particularmente relevantes porque demonstram que a *blockchain*, para além de uma tecnologia de registo distribuído, deve ser encarada como componente de um sistema de produção ciberfísico. A sua integração com Internet das Coisas (*IoT*), *big data analytics* e inteligência artificial é vista como um passo essencial para alcançar a automação total e a rastreabilidade em tempo real. Esta perspetiva confirma que o impacto da *blockchain* será maximizado quando combinada com outras tecnologias digitais da Indústria 4.0, atuando como uma camada de confiança e coordenação sobre os sistemas produtivos existentes.

Comparando os resultados destas revisões com os estudos de caso analisados nos pontos anteriores, observa-se uma clara assimetria entre o potencial teórico e a implementação prática. Enquanto os casos do *TradeLens*, Jovanovic *et al.*, 2022, e da *IKEA*, Sund *et al.*, 2020, evidenciam ganhos localizados e barreiras técnicas, as revisões sistemáticas indicam que a transição para uma adoção em larga escala requer uma abordagem sistémica e cooperativa, envolvendo padronização, regulamentação e políticas industriais alinhadas.

Os trabalhos de Pournader *et al.*, 2019, e Zhao *et al.*, 2019, demonstram que o avanço da *blockchain* nas cadeias de abastecimento depende menos de descobertas tecnológicas isoladas e mais da integração com outras tecnologias digitais e do fortalecimento institucional dos ecossistemas industriais. Para a engenharia, isso significa que a *blockchain* deve ser entendida como parte de uma transformação estrutural mais ampla, orientada para a criação de cadeias de valor inteligentes, rastreáveis e sustentáveis.

4.2.8. *Blockchain, sustentabilidade e economia circular*

De acordo com Esmailian *et al.*, 2020, a aplicação da tecnologia *blockchain* pode desempenhar um papel determinante na transição de sistemas produtivos baseados no modelo linear para modelos sustentáveis e circulares. Historicamente, as cadeias de produção e consumo foram estruturadas segundo o paradigma linear “extrair–produzir–descartar”, caracterizado pela utilização intensiva de recursos naturais, pela produção em massa e pela geração constante de resíduos. Este modelo foi eficiente em termos de produtividade e economia de escala, mas apresenta limitações severas no contexto atual: degradação ambiental, escassez de matérias-primas, elevados custos energéticos e ausência de rastreabilidade ao longo do ciclo de vida dos produtos.

A Economia Circular (EC) surge como resposta a essas limitações, propondo a criação de sistemas produtivos de ciclo fechado, nos quais materiais, componentes e produtos permanecem em uso pelo maior tempo possível. O objetivo central é maximizar o valor dos recursos e reduzir a extração de matérias-primas virgens, através de práticas como reutilização, reparação, remanufatura e reciclagem. Contudo, a implementação prática destes princípios enfrenta barreiras estruturais: dificuldade em recolher informação fiável sobre a origem e o destino dos materiais, falta de interoperabilidade entre sistemas de informação e ausência de mecanismos de confiança entre os diferentes intervenientes das cadeias de valor (Esmailian *et al.*, 2020).

Neste cenário, a *blockchain* apresenta-se como uma tecnologia de suporte que permite criar registos imutáveis e verificáveis de todas as transações ao longo do ciclo de vida dos produtos. Esmailian *et al.*, 2020, identificam quatro formas principais pelas quais a *blockchain* pode facilitar a economia circular:

- I. Rastreabilidade integral dos fluxos de materiais, permitindo o controlo sobre origem, composição e destino de cada componente.
- II. Transparência e confiança entre agentes, assegurando que dados ambientais e sociais são autênticos e auditáveis.
- III. Tokenização de incentivos, possibilitando a criação de mecanismos económicos para recompensar práticas sustentáveis, como a reciclagem ou devolução de equipamentos.

IV. Automatização de processos circulares, através de contratos inteligentes que executam ações de recolha, manutenção ou certificação de forma autónoma.

Esta integração entre *blockchain* e economia circular é particularmente relevante para o planeamento e controlo da produção. Ao garantir a rastreabilidade de materiais e o acesso a dados fiáveis, a tecnologia permite otimizar a gestão de recursos, reduzir desperdícios e melhorar a eficiência das operações. Quando associada a sistemas *IoT* e sensores inteligentes, a *blockchain* possibilita a recolha contínua de informação sobre desempenho e estado dos produtos em uso, promovendo estratégias de manutenção preditiva, reutilização e reciclagem de alto valor agregado (Esmailian *et al.*, 2020).

Contudo, Esmailian *et al.*, 2020, também destacam as limitações e paradoxos da utilização da *blockchain* em contextos sustentáveis. A principal crítica incide sobre o consumo energético elevado das redes públicas baseadas em *proof-of-work*, que pode contrariar os objetivos de redução de impacto ambiental. Além disso, os custos de implementação e a complexidade técnica ainda representam barreiras significativas, especialmente para pequenas e médias empresas. Estes desafios apontam para a necessidade de desenvolver soluções *blockchain* mais eficientes e adaptadas ao contexto industrial, como as redes credenciadas ou híbridas, que combinam segurança e desempenho com menor impacto ambiental.

Comparando com as conclusões de Zhao *et al.*, 2019 e Pournader *et al.*, 2019, verifica-se que a sustentabilidade é um tema transversal à adoção da *blockchain*. Enquanto estes autores enfatizam os ganhos em rastreabilidade e transparência, Esmailian *et al.*, 2020, vão além e enquadram a tecnologia como um instrumento de tomada de decisão ambiental e social, capaz de estruturar ecossistemas produtivos mais responsáveis e colaborativos.

A *blockchain* constitui uma infraestrutura digital com potencial para operacionalizar os princípios da economia circular, oferecendo rastreabilidade integral, confiança distribuída e automação de processos sustentáveis. A sua aplicação representa um passo decisivo na transição de um modelo linear e reativo, focado na eficiência isolada de processos, para um modelo circular e proativo, centrado na regeneração de valor ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos. Além disso, começa a emergir um modelo híbrido de produção, em que coexistem

práticas lineares e circulares, apoiadas por sistemas digitais que monitorizam fluxos, preveem retornos e ajustam a produção em função da disponibilidade de materiais recuperados. Nesse contexto, a *blockchain* atua como elo de integração entre sistemas físicos e digitais, permitindo que decisões estratégicas como design de produto, planeamento de capacidade ou otimização logística, sejam tomadas com base em dados confiáveis e transparentes. Assim, a transição de modelos produtivos torna-se não apenas uma questão ambiental, mas também um novo paradigma de gestão e engenharia, no qual a eficiência e a sustentabilidade são dimensões complementares e interdependentes.

4.2.9. Blockchain no setor energético - Descentralização e novos modelos de negócio

De acordo com Andoni *et al.*, 2019, a aplicação da tecnologia *blockchain* no setor energético representa uma das áreas mais promissoras da digitalização industrial e da transição para sistemas sustentáveis. Tradicionalmente, o setor energético tem operado sob um modelo centralizado, com base em grandes unidades de geração e redes hierarquicamente estruturadas, nas quais a energia flui de forma unidirecional, do produtor ao consumidor. Esse modelo, embora eficaz para garantir estabilidade, previsibilidade e economia de escala, tornou-se progressivamente inadequado para responder aos desafios atuais da transição energética, como a integração de fontes renováveis variáveis, a descentralização da produção e a participação ativa dos consumidores.

A emergência das energias renováveis distribuídas, como a solar fotovoltaica e a eólica de pequena escala, associada à disseminação de tecnologias digitais de medição e controlo, cria a necessidade de novos sistemas de gestão capazes de lidar com fluxos energéticos bidirecionais, decisões automatizadas e interação entre múltiplos agentes. É neste contexto que a *blockchain* surge como uma infraestrutura digital descentralizada, apta a suportar redes energéticas inteligentes (*smart grids*), mercados locais e modelos de negócio inovadores.

Segundo Andoni *et al.*, 2019, as aplicações mais relevantes da *blockchain* no setor energético distribuem-se em quatro grandes categorias:

- I. Comércio *peer-to-peer* (P2P), onde produtores e consumidores podem comprar e vender energia diretamente entre si, eliminando intermediários e reduzindo custos de transação.
- II. Certificação de origem e rastreabilidade energética, que permite garantir a autenticidade de créditos de energia verde, assegurando que o consumo de eletricidade renovável é devidamente comprovado e auditável.
- III. Gestão inteligente de redes elétricas e armazenamento, através de contratos inteligentes que equilibram automaticamente oferta e procura, otimizando o uso de baterias e outras formas de armazenamento distribuído.
- IV. Mobilidade elétrica e integração veículo-rede (*Vehicle-to-Grid – V2G*), onde a *blockchain* regula o fluxo de energia e as transações entre veículos elétricos, postos de carregamento e operadores, criando novos modelos de negócio baseados na flexibilidade energética.

Estas aplicações representam uma mudança profunda no modo como os recursos são planejados, controlados e monetizados. A *blockchain* atua como camada de coordenação digital que conecta as infraestruturas físicas da rede energética (geradores, transformadores, baterias, veículos) com sistemas de informação distribuídos. Essa integração permite automatizar decisões operacionais, eliminar redundâncias administrativas e reduzir tempos de resposta, resultando em maior eficiência de planejamento e utilização de ativos (Andoni *et al.*, 2019).

Além disso, os contratos inteligentes (*smart contracts*) possibilitam a execução automática de regras previamente definidas, substituindo intermediários e reduzindo custos operacionais. Por exemplo, um microprodutor de energia solar pode vender o excedente de eletricidade a um vizinho por meio de um contrato inteligente que mede, valida e liquida a transação instantaneamente. Essa automação reduz a complexidade do processo e elimina potenciais erros humanos, ao mesmo tempo que cria micromercados energéticos locais, baseados na confiança digital (Andoni *et al.*, 2019).

Contudo, a adoção destas soluções enfrenta obstáculos significativos. Andoni *et al.*, 2019, identificam três categorias principais de barreiras:

- Técnicas, relacionadas com a escalabilidade e velocidade de transação da *blockchain*, que ainda são limitantes para aplicações em tempo real, como a gestão de redes elétricas nacionais;
- Económicas, derivadas dos custos de implementação e da incerteza sobre o retorno financeiro dos investimentos, sobretudo em contextos de elevada volatilidade dos mercados energéticos;
- Regulatórias e institucionais, uma vez que os atuais enquadramentos legais foram concebidos para sistemas centralizados e não contemplam transações diretas entre pequenos produtores e consumidores.

Do ponto de vista comparativo, observa-se que o setor energético apresenta semelhanças estruturais com os casos do transporte marítimo, Jovanovic *et al.*, 2022, e da economia circular, Esmaeilian *et al.*, 2020, analisados anteriormente. Em todos, a *blockchain* é utilizada como mecanismo de coordenação entre múltiplos agentes e integração de fluxos físicos e digitais, substituindo sistemas centralizados por modelos colaborativos e distribuídos. No entanto, o setor energético distingue-se pela criticidade do tempo de resposta e pelo impacto direto na estabilidade de infraestruturas essenciais, o que exige soluções altamente confiáveis e escaláveis.

A introdução da *blockchain* também viabiliza o surgimento de novos modelos de negócio e estruturas de mercado. Os mercados locais de energia permitem que comunidades ou edifícios partilhem energia produzida localmente, criando economias circulares de energia. Já os sistemas *P2P* e as micro-redes autogeridas (*microgrids*) promovem a independência energética e reduzem a necessidade de intermediários centralizados. Estes novos modelos refletem uma transição conceptual semelhante à observada em outras indústrias, da centralização para a colaboração digital, e do controlo hierárquico para a coordenação descentralizada (Andoni *et al.*, 2019).

A nível organizacional, esta mudança implica repensar a gestão de operações energéticas sob a ótica da engenharia. Os fluxos energéticos tornam-se análogos a fluxos de materiais numa cadeia de abastecimento digital, exigindo planeamento dinâmico, previsões baseadas em dados e mecanismos de controlo adaptativo. A *blockchain*, neste contexto, fornece a infraestrutura de confiança necessária para que diferentes agentes (fornecedores de energia, operadores, consumidores e

reguladores) possam colaborar sem recorrer a intermediários centralizados (Andoni *et al.*, 2019).

Além disso, a *blockchain* apoia a integração com tecnologias da indústria 4.0, como *IoT*, *Big Data* e inteligência artificial, criando ecossistemas de energia verdadeiramente inteligentes. Sensores *IoT* registam dados de consumo e produção em tempo real; algoritmos de IA otimizam fluxos energéticos; e a *blockchain* assegura a integridade, segurança e auditabilidade das transações. Esta convergência tecnológica dá origem a um sistema energético ciberfísico, em que a informação digital orienta diretamente a operação física da rede, uma materialização prática dos princípios de sistemas produtivos inteligentes (Andoni *et al.*, 2019).

Do ponto de vista da sustentabilidade, a *blockchain* reforça a transparência e a rastreabilidade ambiental, permitindo o acompanhamento preciso das emissões associadas à geração e ao consumo de energia. Essa rastreabilidade é essencial para mercados de carbono e esquemas de compensação, bem como para assegurar a veracidade de certificados de energia verde. No entanto, há também um paradoxo: a eficiência ambiental da *blockchain* depende do seu próprio mecanismo de consenso. Enquanto redes públicas baseadas em *proof-of-work* consomem grandes quantidades de energia, as *blockchains* credenciadas ou baseadas em *proof-of-stake* mostram-se mais adequadas ao contexto energético, combinando segurança, desempenho e baixo impacto ambiental (Andoni *et al.*, 2019).

Conclui-se que, a aplicação da *blockchain* no setor energético ilustra de forma exemplar a transição de um modelo centralizado, hierárquico e rígido para um modelo descentralizado, dinâmico e colaborativo, no qual a geração, distribuição e consumo de energia são geridos de forma inteligente e distribuída. Para a engenharia de produção, esta evolução representa não apenas uma mudança tecnológica, mas uma transformação paradigmática na forma de conceber, operar e otimizar sistemas complexos. A *blockchain*, neste contexto, não é apenas uma tecnologia de registo, mas um instrumento de reconfiguração de processos produtivos e logísticos, promovendo eficiência, sustentabilidade e autonomia operacional. A descentralização energética apoiada por *blockchain* pode, assim, ser interpretada como uma extensão natural dos princípios da Indústria 4.0 e

demonstrar um passo em direção a sistemas de produção ciberfísicos auto-organizados, interconectados e orientados para a sustentabilidade global.

4.2.10. Blockchain na impressão 3D e cadeias de abastecimento digitais

O fabrico aditivo, *Additive Manufacturing (AM)*, também conhecida como impressão 3D, tem emergido como um dos campos industriais mais promissores para a integração da tecnologia *blockchain*. De acordo com Kurpjuweit *et al.*, 2019, a combinação destas duas tecnologias disruptivas apresenta um potencial transformador na forma como as cadeias de abastecimento são concebidas, monitorizadas e geridas. O fabrico aditivo, ao basear-se na produção de componentes a partir de ficheiros digitais, expõe as empresas a riscos de violação de propriedade intelectual, falsificação de produtos e manipulação de dados. Nesse contexto, a *blockchain* surge como um mecanismo de confiança descentralizada, capaz de garantir a autenticidade, rastreabilidade e integridade dos ficheiros digitais e das peças produzidas.

Os autores destacam quatro áreas centrais onde a *blockchain* gera valor no fabrico aditivo: gestão de direitos de propriedade intelectual (*IP*), monitorização do ciclo de vida dos produtos, melhoria de processos produtivos e segurança da informação. A tecnologia permite o registo imutável de transações, a verificação automática de licenças de produção através de contratos inteligentes e a identificação inequívoca de peças originais. Estas características tornam possível prevenir a produção e a distribuição de peças falsificadas, assegurando a conformidade com normas industriais e de segurança. Além disso, a *blockchain* possibilita a criação de um rasto digital completo de cada peça, incluindo parâmetros de fabrico, certificações, transferências de propriedade e condições de utilização, o que aumenta a transparência e a confiança entre parceiros da cadeia de abastecimento (Kurpjuweit *et al.*, 2019).

Kurpjuweit *et al.*, 2019, referem ainda que a integração entre *blockchain* e fabrico aditivo pode catalisar a transição para modelos de produção descentralizada, com cadeias de abastecimento mais ágeis, resilientes e sustentáveis. Ao permitir a produção distribuída e sob demanda, esta combinação reduz tempos de entrega,

custos logísticos e níveis de stock, aproximando a produção dos consumidores finais. A digitalização integral dos fluxos de informação e a possibilidade de rastrear cada fase da produção reforçam também a capacidade de resposta a falhas, *recalls* ou incidentes de qualidade.

A introdução de gémeos digitais (*digital twins*), cuja informação é armazenada e validada na *blockchain*, representa outro avanço significativo. Estes gémeos digitais funcionam como representações virtuais das peças físicas, incorporando dados de fabrico, manutenção e desempenho, o que possibilita uma monitorização contínua e a otimização futura dos processos (Kurpjuweit *et al.*, 2019).

Exemplos práticos dessa integração incluem os projetos *SAMPL* (*Secure Additive Manufacturing Platform*) e *Genesis of Things*, ambos mencionados por Kurpjuweit *et al.*, 2019. O primeiro combina *blockchain*, *IoT* e técnicas criptográficas para assegurar a autenticidade dos ficheiros digitais e a rastreabilidade completa das peças produzidas por impressão 3D, protegendo a propriedade intelectual e garantindo a integridade dos processos de fabrico. Já o segundo explora o uso de contratos inteligentes e gémeos digitais para automatizar pagamentos, licenças de produção e certificações, promovendo modelos de produção descentralizada e colaborativa no contexto da Indústria 4.0. Estes casos demonstram a viabilidade da aplicação do *blockchain* em ecossistemas industriais digitalizados, reforçando o seu papel como tecnologia facilitadora da confiança e transparência nas cadeias de abastecimento digitais.

Apesar dos benefícios evidenciados, os autores identificam barreiras à adoção, nomeadamente a falta de normalização técnica, os desafios de interoperabilidade entre plataformas, a escassez de especialistas qualificados em *blockchain* e a necessidade de estruturas de administração eficazes. No entanto, Kurpjuweit *et al.*, 2019, concluem que a convergência entre *blockchain* e fabrico aditivo representa um passo crucial para a Indústria 4.0, promovendo cadeias de abastecimento digitais, sustentáveis e baseadas na confiança.

4.2.11. Blockchain no setor do petróleo e gás

A indústria do petróleo e gás tem vindo a adotar gradualmente a tecnologia *blockchain* como parte da sua transformação digital, procurando soluções que

melhorem a eficiência, segurança e transparência das suas operações. De acordo com Lu et al., 2019, a aplicação da *blockchain* neste setor encontra-se ainda numa fase inicial, mas apresenta elevado potencial em diversas áreas da cadeia de valor como nas transações comerciais, gestão e tomada de decisão, supervisão e cibersegurança.

No domínio das transações, a utilização de contratos inteligentes permite automatizar acordos entre diferentes partes, reduzindo custos administrativos e o tempo de reconciliação de dados. Estes contratos digitais substituem intermediários e simplificam processos complexos, como os da comercialização internacional de petróleo bruto e gás natural, projetos como o *VAKT* e o *komgo SA* demonstram o impacto desta tecnologia, ao fornecer plataformas baseadas em *blockchain* que otimizam as operações pós-transação e aumentam a confiança entre operadores, comerciais e refinarias (Lu et al., 2019).

O *VAKT* é uma plataforma digital desenvolvida por uma associação internacional de empresas energéticas e financeiras, incluindo a *BP*, *Shell*, *TotalEnergies*, *Equinor*, *Gunvor* e *ING*. Baseada numa rede *blockchain* credenciada, a plataforma digitaliza todo o processo pós-transação do comércio de petróleo bruto, substituindo sistemas manuais e baseados em papel por registos imutáveis e partilhados entre todos os intervenientes. A sua integração com contratos inteligentes permite automatizar tarefas administrativas e assegurar a integridade das informações comerciais. O *komgo SA*, por sua vez, complementa o ecossistema do *VAKT* ao atuar na vertente de financiamento comercial (*trade finance*), oferecendo um sistema seguro e descentralizado para a autenticação de documentos, emissão de garantias bancárias e liquidação de créditos. Estas plataformas demonstram como a *blockchain* pode ligar a componente física e financeira da cadeia de valor energética, reforçando a transparência, rastreabilidade e confiança entre os intervenientes (Lu et al., 2019).

Esta aplicação apresenta semelhanças com o setor automóvel, onde os contratos inteligentes também têm sido utilizados para automatizar transações e rastrear o ciclo de vida de componentes (Reddy et al., 2021), mas diferencia-se pela escala financeira e complexidade regulatória envolvidas no comércio energético global.

Na vertente de gestão e decisão, a *blockchain* oferece um suporte seguro para o registo e partilha de dados entre múltiplas partes interessadas, desde a exploração até à refinação. O uso de registos imutáveis e distribuídos melhora a integridade da informação e reduz erros em processos críticos, como a monitorização de equipamentos, o controlo de integridade de ativos e a rastreabilidade de materiais (Lu *et al.*, 2019). Tal como ocorre na produção inteligente, onde a integração entre *blockchain* e *IoT* reforça a fiabilidade dos dados de produção, também no setor petrolífero essa sinergia permite monitorização remota e validação automática de dados operacionais. No entanto, enquanto na manufatura o foco recai sobre a sincronização de sistemas de produção, aqui a prioridade é a segurança operacional e a prevenção de falhas em infraestruturas críticas (Lu *et al.*, 2019).

Em termos de supervisão e conformidade, a *blockchain* aumenta a transparência ao longo de toda a cadeia de fornecimento, permitindo auditorias mais rápidas e precisas, e facilitando o cumprimento de normas internacionais de rastreabilidade e sustentabilidade (Saber *et al.*, 2019).

Esta função é comparável ao que se verifica na indústria farmacêutica, onde a tecnologia é usada para assegurar a autenticidade de medicamentos e o cumprimento de requisitos legais. No entanto, no setor energético, a ênfase recai sobre a verificação ambiental e a rastreabilidade de emissões, o que reforça o papel da *blockchain* na transição energética e sustentabilidade industrial (Andoni *et al.*, 2019).

No contexto da cibersegurança, a descentralização da rede e o uso de criptografia avançada reduzem o risco de ataques informáticos, tornando a gestão de dados industriais mais robusta. Esta característica aproxima-se das vantagens observadas na produção aditiva, onde a *blockchain* protege a integridade dos ficheiros digitais e os direitos de propriedade intelectual (Kurzweil *et al.*, 2019). Em ambos os casos, a tecnologia atua como barreira de segurança digital, garantindo a proteção dos dados partilhados em ecossistemas industriais distribuídos.

Embora o setor ainda enfrente desafios técnicos e regulatórios, as iniciativas em curso apontam para uma tendência de convergência entre *blockchain*, inteligência artificial e computação em *cloud*, criando sistemas híbridos mais escaláveis e eficientes (Lu *et al.*, 2019). Assim, a aplicação da *blockchain* na

indústria do petróleo e gás surge como um bom exemplo da transformação digital industrial, que combina os avanços obtidos noutros setores, desde a rastreabilidade automóvel até à produção inteligente, num contexto de alta complexidade e criticidade operacional.

4.2.12. Considerações finais

A análise dos diferentes setores evidencia que a tecnologia *blockchain* se encontra num processo de consolidação gradual como infraestrutura digital de suporte a cadeias de valor complexas. Embora o nível de maturidade varie consoante o contexto, os resultados apontam para um padrão comum, a *blockchain* não atua isoladamente, mas como um mecanismo de integração entre processos físicos, informacionais e organizacionais, promovendo transparência, rastreabilidade e eficiência em ecossistemas distribuídos.

Nos setores mais avançados em digitalização, como o transporte marítimo (Jovanovic *et al.*, 2022) o comércio de retalho (Sund *et al.*, 2020) e o setor energético (Andoni *et al.*, 2019), a *blockchain* tem vindo a ser implementada como plataforma colaborativa entre múltiplos intervenientes, permitindo reduzir redundâncias de informação e melhorar o controlo operacional. Estes casos demonstram que a adoção bem-sucedida depende não apenas da tecnologia, mas também de modelos de tomada de decisão interorganizacional e da interoperabilidade com sistemas legados.

Em setores com maior fragmentação e menor capacidade tecnológica, como o agroalimentar, (Casado-Vara *et al.*, 2018) e (Rogerson & Parry, 2020), e o têxtil (Agrawal *et al.*, 2021), a *blockchain* é aplicada de forma mais restrita, principalmente para garantir rastreabilidade e certificação ética e ambiental. Nesses contextos, o valor acrescentado está na capacidade de fornecer informação fiável e auditável, respondendo a exigências de consumidores e reguladores. No entanto, os desafios de custo, padronização e competências técnicas ainda limitam a sua disseminação.

As revisões sistemáticas (Pournader *et al.*, 2019) e (Zhao *et al.*, 2019) reforçam esta leitura, mostrando que a maioria das aplicações industriais permanece em fase piloto ou experimental, e que a criação de valor sustentado requer a integração da

blockchain com tecnologias da Indústria 4.0, como IoT, Big Data e inteligência artificial. Essa integração é fundamental para alcançar a automação completa e a rastreabilidade em tempo real, transformando a *blockchain* num elemento de coordenação e validação dentro de sistemas produtivos ciberfísicos.

Por outro lado, estudos como Esmailian *et al.*, 2020, ampliam o debate ao demonstrar que a *blockchain* pode ser também um instrumento de sustentabilidade e gestão ambiental, capaz de operacionalizar os princípios da Economia Circular. Através da rastreabilidade de materiais e da tokenização de incentivos, a tecnologia pode suportar modelos produtivos circulares, contribuindo para a redução do desperdício e para a regeneração de valor ao longo do ciclo de vida dos produtos.

De forma transversal, a análise comparativa evidencia que a adoção da *blockchain* implica transformações não apenas tecnológicas, mas também organizacionais e culturais. A descentralização inerente à tecnologia exige novos modelos de cooperação e partilha de dados, substituindo estruturas hierárquicas tradicionais por redes colaborativas de valor. Assim, a *blockchain* pode ser vista como um catalisador de uma nova lógica de produção distribuída, onde a confiança é mediada por código e a coordenação é automatizada através de contratos inteligentes.

Os resultados convergem para três conclusões principais:

- I. Eficiência e rastreabilidade: a *blockchain* melhora o controlo de processos e reduz ineficiências ao longo das cadeias de abastecimento.
- II. Integração e interoperabilidade: a tecnologia atua como camada digital de coordenação entre diferentes sistemas e agentes, facilitando a transição para ecossistemas produtivos inteligentes.
- III. Sustentabilidade e inovação organizacional: ao promover transparência e responsabilização, a *blockchain* apoia a adoção de práticas sustentáveis e a criação de novos modelos de negócio circulares e descentralizados.

No contexto industrial, a implementação da tecnologia *blockchain* irá, sem dúvida, criar oportunidades de inovação, através da integração da mesma com equipamentos e sistemas industriais, otimizando processos e aumentando a

transparência tornando assim os sistemas mais confiáveis e abertos para o registo e compartilhamento de informações, sendo alguns dos pontos de inovação:

- Transparência total durante todo o processo de produção e distribuição, tornando possível o rastreamento do produto a tempo real;
- Redução do risco de manipulação de informações;
- Redução do erro humano e aumento da eficiência de processos;
- Controlo de Stocks mais eficiente, reduzindo perdas e desvios;
- Redução de custos operacionais, tornando os processos mais ágeis e menos burocráticos;
- Registos imutáveis que facilitam auditorias e verificação de conformidade em relação a normas e regulamentos, o que permite a redução do tempo de espera de processos de certificação e fiscalização;
- Integração de dispositivos *IoT* com a tecnologia *blockchain* para otimização de máquinas e equipamentos, melhorando a eficiência operacional e manutenção preditiva;
- Garantia de identidades digitais seguras e descentralizadas.

O conjunto dos casos analisados demonstra que a blockchain está a evoluir de um conceito tecnológico emergente para uma infraestrutura estratégica da Indústria 4.0, com impacto direto na forma como os sistemas produtivos são concebidos, operados e monitorizados. Embora os desafios de padronização, escalabilidade e regulação ainda persistam, a tendência observada indica que o futuro da engenharia será cada vez mais orientado por dados, descentralizado e colaborativo, e que a blockchain desempenhará um papel central nesta transformação estrutural.

Capítulo 5

Síntese e análise do trabalho desenvolvido

Este capítulo apresenta uma visão integrada dos resultados alcançados ao longo da investigação, articulando os contributos teóricos e práticos obtidos através da revisão sistemática da literatura. O capítulo analisa de forma crítica o papel da tecnologia *blockchain* no contexto da Indústria 4.0, evidenciando como esta pode potenciar a transformação digital das organizações industriais. São discutidos os principais benefícios identificados, bem como as limitações e desafios observados durante o estudo, com especial destaque para a maturidade tecnológica, a rastreabilidade, a transparência e a sustentabilidade das operações industriais.

5.1. Síntese do trabalho desenvolvido

Através de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida de acordo com o protocolo *PRISMA*, foi reunido e analisado um conjunto representativo de publicações científicas indexadas nas bases *Scopus*, *ScienceDirect* e *Web of Science*, publicadas entre 2018 e 2024. A seleção rigorosa dos estudos permitiu construir uma base sólida de conhecimento, englobando artigos de revistas de referência como *Journal of Manufacturing Systems*, *International Journal of Production Research* e *Computers and Industrial Engineering*.

O processo metodológico envolveu a aplicação de critérios de inclusão e exclusão bem definidos e a utilização de termos de pesquisa relacionados com *blockchain*, *industry*, *supply chain*, *IoT* e *digital transformation*. A partir desse processo, foi possível identificar as áreas de aplicação mais frequentes, os benefícios observados, as barreiras comuns e as lacunas de investigação existentes na literatura.

Os resultados obtidos revelam que o interesse científico e industrial na integração da *blockchain* na Indústria 4.0 aumentou significativamente após 2020, evidenciando uma tendência crescente de exploração desta tecnologia em contextos produtivos e logísticos. O trabalho desenvolvido oferece, assim, uma visão estruturada e crítica sobre o estado atual de maturidade tecnológica, destacando os setores mais avançados na sua implementação e os principais impactos documentados na literatura.

5.2. Principais ensinamentos

5.2.1. Contributos teóricos e conceptuais

A análise dos estudos demonstra que a *blockchain* é reconhecida como uma infraestrutura digital transformadora, capaz de redefinir a forma como as organizações industriais registam, partilham e validam informação. A tecnologia assenta em princípios de descentralização, consenso, imutabilidade e criptografia, proporcionando uma base de confiança e transparência num ecossistema caracterizado por múltiplos intervenientes e elevada complexidade operacional.

Os artigos analisados indicam que o modelo de *blockchain* do tipo consórcio é o mais adequado para contextos industriais, pois equilibra a privacidade das operações internas com a colaboração entre parceiros da cadeia de valor. Este tipo de abordagem é particularmente relevante em cadeias de abastecimento globais, onde a partilha de informação entre fornecedores, fabricantes e distribuidores exige um mecanismo de validação confiável, sem expor dados sensíveis.

A literatura também confirma a forte relação entre *blockchain*, *IoT* e sistemas ciberfísicos (*CPS*). A convergência destas tecnologias permite criar ambientes industriais inteligentes, onde dados provenientes de sensores e equipamentos são registados automaticamente em redes *blockchain*, assegurando a rastreabilidade em tempo real e a integridade dos registos.

Em termos conceptuais, os autores analisados sublinham que a *blockchain* contribui para a digitalização confiável da indústria, funcionando como um catalisador da Indústria 4.0, ao mesmo tempo que introduz novos paradigmas de administração descentralizada, transparência operacional e responsabilidade partilhada.

5.2.2. Impactos observados na literatura

A revisão sistemática identificou padrões claros e recorrentes nos impactos obtidos através da implementação da *blockchain* em diferentes setores industriais:

- **Melhoria significativa da rastreabilidade dos produtos e componentes em toda a cadeia de abastecimento** - Estudos como os de Wang *et al.*, 2018 e Reddy *et al.*, 2021, demonstram que a *blockchain* permite documentar cada etapa do ciclo de vida do produto, desde a origem da matéria-prima até ao consumidor final, reduzindo erros e aumentando a confiança entre parceiros.
- **Aumento da transparência e redução de fraudes**: A imutabilidade dos registos reforça a autenticidade da informação, sendo amplamente referida em setores como o alimentar, farmacêutico e automóvel.
- **Eficiência e automatização de processos** - O uso de *smart contracts* foi consistentemente apontado como um dos impactos mais relevantes,

permitindo a execução automática de transações, auditorias, verificações de qualidade e pagamentos entre entidades.

- **Melhoria da sustentabilidade e economia circular** - Diversos artigos analisados destacam a utilização da *blockchain* como ferramenta de monitorização de indicadores ambientais e de certificação ecológica, permitindo rastrear emissões, consumo energético e origem de materiais reciclados.
- **Segurança e cibersegurança** - A descentralização dos registos reduz vulnerabilidades a ataques informáticos e elimina pontos únicos de falha.

Além dos benefícios, os resultados também revelam barreiras transversais à adoção:

- Custos de implementação e consumo energético inicial elevado, especialmente em redes públicas;
- Ausência de padronização internacional e interoperabilidade entre plataformas;
- Resistência cultural e organizacional à partilha de dados;
- Défice de competências técnicas especializadas;
- Escalabilidade limitada em aplicações de larga escala.

Apesar dessas limitações, a literatura converge quanto ao potencial transformador da *blockchain*, com impactos positivos comprovados na eficiência operacional, confiabilidade da informação e sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A Tabela 5.1 apresenta uma visão estruturada dos setores industriais mais frequentemente abordados na literatura, bem como dos benefícios, desafios e impactos identificados em cada um deles. Esta síntese permite visualizar de forma clara as tendências comuns entre diferentes áreas de aplicação da tecnologia *blockchain*, evidenciando tanto o seu potencial transformador quanto as limitações que ainda condicionam a sua adoção. Além disso, o quadro reforça a natureza transversal da *blockchain*, cuja aplicabilidade se estende da cadeia de abastecimento e logística até setores como o energético, têxtil e alimentar, confirmando a sua relevância crescente como tecnologia ascendente na Indústria 4.0.

Tabela 5.1 - Resultados e Impactos Identificados na RSL.

Setor Industrial / Área de Aplicação	Principais Benefícios Observados	Desafios e Limitações Identificados	Impactos Globais na Indústria	Referências Principais
Cadeia de Abastecimento (Supply Chain)	<ul style="list-style-type: none"> - Rastreabilidade integral de produtos e matérias-primas - Redução de fraudes e erros de registo - Transparência entre parceiros - Automatização de contratos (<i>smart contracts</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Escalabilidade limitada - Falta de interoperabilidade entre plataformas - Resistência à partilha de dados 	<p>Aumento da confiança interorganizacional e eficiência logística</p>	<p>Wang et al. (2018); Saberri et al. (2019); Liu et al. (2023)</p>
Logística e Transporte Marítimo	<ul style="list-style-type: none"> - Visibilidade em tempo real do fluxo logístico - Redução de tempo e custos administrativos - Segurança documental e rastreio de contentores 	<ul style="list-style-type: none"> - Custos iniciais de implementação - Necessidade de colaboração multilateral 	<p>Melhoria da rastreabilidade e eficiência operacional global</p>	<p>Reddy et al. (2021); Choi et al. (2018)</p>
Setor Alimentar	<ul style="list-style-type: none"> - Garantia de origem e autenticidade dos produtos - Certificação sanitária e controlo de qualidade - Redução de desperdício alimentar 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexidade regulatória - Falta de padronização de dados entre sistemas 	<p>Reforço da confiança do consumidor e conformidade regulatória</p>	<p>Saberri et al. (2019); Kshetri (2018)</p>

Indústria Têxtil e Moda	<ul style="list-style-type: none"> - Rastreabilidade ética e social - Monitorização de processos sustentáveis - Prevenção de falsificações e trabalho não certificado 	<ul style="list-style-type: none"> - Custos elevados de integração tecnológica - Falta de incentivos de mercado 	Aumento da transparência e sustentabilidade da cadeia têxtil	Gad et al. (2022); Liu et al. (2022)
Setor Energético	<ul style="list-style-type: none"> - Descentralização da gestão energética - Registo de transações <i>peer-to-peer</i> - Integração com <i>IoT</i> para monitorização de consumo 	<ul style="list-style-type: none"> - Regulação e fiabilidade das redes - Escalabilidade em ambientes distribuídos 	Criação de novos modelos de negócio e eficiência energética	Sizan et al. (2025); Azevedo et al. (2023)
Manufatura e Produção Industrial (Indústria 4.0)	<ul style="list-style-type: none"> - Integração de <i>blockchain</i> com <i>IoT</i> e <i>CPS</i> - Registo fiável de dados de produção - Gestão automatizada de stocks e manutenção preditiva 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de competências técnicas - Complexidade de integração entre sistemas legados 	Digitalização e otimização dos processos produtivos	Aoun et al. (2021); Enrique et al. (2021)

Com o objetivo de consolidar a análise efetuada e demonstrar a coerência entre as questões iniciais da investigação e os resultados obtidos, procedeu-se à sistematização dos principais resultados da revisão sistemática da literatura. A Tabela 5.2 apresenta essa correspondência, sintetizando as respostas encontradas para cada uma das perguntas de investigação formuladas no início do estudo. Esta estrutura permite compreender de forma integrada como a tecnologia *blockchain* tem sido conceptualizada, aplicada e avaliada no contexto industrial, bem como as

implicações decorrentes da sua adoção nas cadeias de valor e nos sistemas produtivos.

Tabela 5.2 – Perguntas e respostas

Pergunta de Investigação	Síntese Analítica das Respostas Obtidas
<p>I. O que é a tecnologia <i>blockchain</i> e como é conceptualizada no contexto industrial?</p>	<p>A literatura caracteriza a <i>blockchain</i> como uma infraestrutura descentralizada e imutável de registo digital, suportada por mecanismos de consenso e encriptação que garantem transparência, segurança e rastreabilidade. No domínio industrial, é entendida como um instrumento de confiança e automação, capaz de eliminar intermediários e assegurar a integridade dos dados ao longo de todo o ciclo produtivo.</p>
<p>II. Em que medida a <i>blockchain</i> tem sido implementada em setores industriais e produtivos?</p>	<p>As aplicações práticas concentram-se em cadeias de abastecimento, logística, indústria alimentar, farmacêutica, têxtil e energética. Embora o nível de adoção ainda seja reduzido, há um crescimento contínuo de projetos-piloto e associações empresariais que utilizam <i>blockchain</i> para rastrear produtos, validar certificações e melhorar a gestão de informação entre parceiros industriais.</p>
<p>III. Qual o nível de maturidade da tecnologia <i>blockchain</i> nas cadeias de abastecimento e nos sistemas de produção?</p>	<p>Os estudos indicam que a <i>blockchain</i> se encontra numa fase de maturidade intermédia, com avanços significativos em rastreabilidade e automação, mas ainda distante de uma implementação padronizada e escalável. A adoção permanece dependente de investimentos em infraestrutura digital, normalização técnica e integração com sistemas antiquados.</p>
<p>IV. Quais os principais benefícios, desafios e barreiras associados à adoção da <i>blockchain</i> na indústria?</p>	<p>Entre os benefícios destacam-se a transparência, segurança de dados, confiança interorganizacional e eficiência operacional. As barreiras mais referidas incluem a falta de interoperabilidade entre plataformas, custos elevados de implementação, resistência à mudança organizacional e limitações tecnológicas relacionadas com escalabilidade e consumo energético.</p>

<p>V. De que forma a <i>blockchain</i> contribui para a rastreabilidade, transparência e sustentabilidade das operações industriais?</p>	<p>A <i>blockchain</i> assegura rastreabilidade total das operações e transparência na partilha de dados, reforçando a confiança entre agentes e a verificação da conformidade ao longo da cadeia de valor. Quando combinada com <i>IoT</i> e Inteligência Artificial, permite monitorizar indicadores ambientais e otimizar recursos, apoiando práticas sustentáveis e de economia circular.</p>
<p>VI. Que metodologias e abordagens tecnológicas têm sido aplicadas para a implementação da <i>blockchain</i> na indústria?</p>	<p>As abordagens identificadas incluem estudos de caso, modelos experimentais e <i>frameworks</i> híbridas baseadas em plataformas como <i>Ethereum</i>, <i>Hyperledger Fabric</i> e <i>Corda</i>. A integração com tecnologias como <i>IoT</i>, <i>Big Data</i> e <i>Cloud</i> é frequente, reforçando a recolha e validação de dados em tempo real. O uso de <i>smart contracts</i> surge como elemento central para automatizar transações e garantir a integridade dos processos.</p>
<p>VII. Quais são as tendências e direções futuras da investigação sobre <i>blockchain</i> em contextos industriais?</p>	<p>As tendências apontam para uma maior integração da <i>blockchain</i> com tecnologias da Indústria 4.0, em especial <i>IoT</i> e sistemas ciberfísicos, bem como para a criação de modelos interoperáveis e padronizados. As futuras investigações deverão focar-se na validação empírica, na avaliação quantitativa de impactos económicos e ambientais e no desenvolvimento de protocolos sustentáveis e energeticamente eficientes.</p>

5.3. Limitações do estudo

Apesar do rigor metodológico adotado, a presente investigação apresenta um conjunto de limitações que importa reconhecer para contextualizar adequadamente os resultados obtidos.

A primeira limitação decorre da natureza bibliográfica do estudo. Por se tratar de uma revisão sistemática da literatura, as conclusões baseiam-se exclusivamente em publicações existentes, não havendo recolha de dados empíricos que permitam validar na prática as tendências e impactos identificados. Consequentemente, os resultados refletem o conhecimento reportado pelos autores analisados, podendo divergir da realidade operacional de diferentes indústrias.

Em segundo lugar, a diversidade dos estudos incluídos constitui um desafio. A literatura sobre *blockchain* no âmbito industrial apresenta abordagens muito diversas, sendo elas técnicas, económicas e organizacionais, com metodologias e métricas distintas. Essa diversidade, embora enriquecedora, dificulta a comparação

direta dos resultados e impede a obtenção de conclusões estatisticamente consistentes.

Outra limitação relevante prende-se com a recente evolução da tecnologia *blockchain*. Trata-se de uma área em rápida transformação, na qual novas soluções, protocolos e aplicações surgem constantemente. Assim, parte dos trabalhos analisados poderá tornar-se rapidamente desatualizada, sobretudo os publicados nos primeiros anos do período considerado.

As limitações identificadas não comprometem a validade do estudo, mas sublinham a importância de investigações empíricas complementares, capazes de validar os contributos teóricos aqui obtidos e de avaliar, de forma quantitativa, o impacto efetivo da *blockchain* nas operações industriais.

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimento

Futuro

Este capítulo apresenta as conclusões finais da dissertação e as principais direções de desenvolvimento futuro identificadas. Nele são sintetizados os resultados obtidos através da revisão sistemática da literatura, destacando o papel da tecnologia *blockchain* como elemento estruturante da Indústria 4.0 e como motor da transformação digital no setor industrial, evidenciando as limitações e desafios da adoção da tecnologia *blockchain*. Para além das conclusões gerais, são discutidas oportunidades de investigação futura.

6.1. Conclusões

A presente dissertação permitiu desenvolver uma análise sistemática e crítica sobre o estado atual da aplicação da tecnologia *blockchain* no contexto industrial, evidenciando o seu papel como um dos principais pilares tecnológicos da Indústria 4.0. Através da aplicação rigorosa do protocolo *PRISMA*, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura que reuniu e avaliou estudos científicos principalmente publicados entre 2018 e 2024, provenientes das principais bases de dados internacionais.

O estudo permitiu identificar três contributos centrais.

Em primeiro lugar, a investigação demonstrou que a *blockchain* evoluiu de uma tecnologia emergente para uma infraestrutura digital estratégica, capaz de garantir rastreabilidade, transparência, segurança e confiança nas cadeias de valor industriais. As publicações analisadas mostraram que setores como o alimentar, logístico, têxtil e energético já beneficiam da aplicação desta tecnologia em processos de rastreamento, certificação, monitorização e controlo de qualidade.

Através dos artigos analisados, foi possível constatar que a integração da *blockchain* com *IoT* e sistemas ciberfísicos potencia a criação de ecossistemas industriais inteligentes, onde a recolha e validação automática de dados em tempo real permite maior eficiência operacional e redução de custos administrativos. Esta convergência tecnológica surge, na literatura, como um vetor essencial para a transformação digital das indústrias modernas.

A análise crítica da literatura revelou as principais barreiras e desafios que ainda condicionam a adoção generalizada da *blockchain*. Entre eles destacam-se a falta de normalização técnica e interoperabilidade, os custos de implementação, a escassez de competências especializadas e a resistência organizacional à mudança digital. Estas limitações explicam porque a adoção industrial da *blockchain*, apesar de promissora, ainda se encontra numa fase de consolidação.

Os resultados obtidos demonstram que o impacto da *blockchain* na indústria é evidente, tanto a nível tecnológico como organizacional. A sua implementação contribui para melhorar a rastreabilidade de produtos, reduzir desperdícios, aumentar a transparência e fortalecer a confiança entre parceiros da cadeia de valor. Do ponto de vista académico, este trabalho contribui para a sistematização do

conhecimento existente, oferecendo uma visão integrada sobre os benefícios, limitações e tendências associadas à adoção desta tecnologia no panorama industrial global.

Em termos práticos, as conclusões desta dissertação podem servir para compreender o potencial da *blockchain* na otimização de processos e na construção de cadeias produtivas mais sustentáveis e eficientes. A identificação das áreas de maior maturidade tecnológica e das lacunas ainda existentes fornece uma base sólida para o planeamento de futuras implementações e investigações aplicadas.

É possível se concluir através deste estudo que a *blockchain* representa muito mais do que uma inovação digital, é uma infraestrutura de confiança e colaboração capaz de redefinir a forma como as organizações industriais partilham dados, automatizam processos e asseguram transparência em toda a cadeia de valor. A sua integração progressiva com outras tecnologias da Indústria 4.0 constitui um passo decisivo para a digitalização total e sustentável da produção industrial, reforçando o papel da inovação tecnológica como motor da competitividade e da transformação global do setor.

6.2. Desenvolvimentos futuros

A revisão sistemática realizada permitiu identificar não apenas o estado atual da investigação sobre a tecnologia *blockchain* no contexto industrial, mas também diversas lacunas e oportunidades de aprofundamento científico e tecnológico. As perspetivas de investigação futura aqui apresentadas visam orientar o desenvolvimento de novos estudos que possam consolidar e validar empiricamente as conclusões desta dissertação.

Destaca-se a necessidade de estudos experimentais e aplicados em ambientes industriais reais. Embora a literatura analisada apresente resultados promissores, a maioria dos trabalhos permanece de natureza conceptual ou exploratória, sem validação prática. Torna-se, portanto, essencial a realização de projetos-piloto e estudos de caso em empresas de diferentes setores como o automóvel, têxtil, alimentar e energético, que permitam medir de forma quantitativa os ganhos de eficiência, rastreabilidade e sustentabilidade proporcionados pela *blockchain*. Estes

estudos empíricos seriam fundamentais para demonstrar o retorno do investimento e para apoiar decisões estratégicas de adoção tecnológica.

Outra linha de investigação relevante consiste na integração da *blockchain* com outras tecnologias facilitadoras da Indústria 4.0, nomeadamente a *Internet of Things (IoT)*, a Inteligência Artificial (IA) e os sistemas ciberfísicos (*CPS*). A combinação destas ferramentas poderá potenciar o desenvolvimento de ecossistemas industriais inteligentes, onde os dados recolhidos por sensores *IoT* sejam registados e validados automaticamente em redes *blockchain*, garantindo a integridade, segurança e rastreabilidade de toda a operação. Esta integração constitui um campo fértil para estudos académicos e experimentais, sobretudo no contexto da monitorização de qualidade, manutenção preditiva e automação de cadeias logísticas.

Um terceiro eixo de investigação prende-se com a padronização e interoperabilidade das plataformas *blockchain* utilizadas na indústria. A falta de normas técnicas universais constitui atualmente uma das principais barreiras à adoção generalizada. Investigações futuras poderão concentrar-se na definição de modelos de interoperabilidade, que permitam a comunicação entre redes distintas (públicas, privadas e de consórcio) e entre diferentes agentes da cadeia de valor. A criação de protocolos e *frameworks* comuns contribuiria significativamente para reduzir custos e aumentar a eficiência dos sistemas baseados em *blockchain*.

Outra área que merece aprofundamento diz respeito à avaliação quantitativa do impacto económico e ambiental da tecnologia. A maioria dos estudos analisados foca-se em benefícios qualitativos, como transparência e confiança, sendo escassas as análises que quantificam ganhos financeiros, redução de desperdício, diminuição de emissões ou aumento da produtividade. Assim, futuras investigações deverão desenvolver modelos de avaliação e métricas de desempenho que permitam medir o impacto real da *blockchain* nas dimensões económica, ambiental e social da sustentabilidade industrial.

Adicionalmente, a análise da adoção da *blockchain* em pequenas e médias empresas (PME) surge como uma área de elevado interesse. A literatura atual está fortemente orientada para grandes organizações e consórcios internacionais, deixando em aberto o estudo de como as PME podem beneficiar de soluções *blockchain* simplificadas, adaptadas à sua escala e recursos. A compreensão das

barreiras, incentivos e condições de sucesso neste segmento seria de grande valor para a difusão prática da tecnologia.

Por fim, é recomendável o desenvolvimento de estudos interdisciplinares que abordem os aspectos organizacionais, humanos e de administração digital associados à *blockchain*. Questões como a gestão da mudança, a formação de competências digitais, a confiança entre parceiros e a estruturação de contratos inteligentes seguros e éticos constituem dimensões essenciais para uma adoção sustentável e responsável da tecnologia na indústria.

As linhas de investigação futura identificadas apontam para a necessidade de aprofundar a componente empírica, fortalecer a integração tecnológica e desenvolver modelos padronizados e sustentáveis de adoção. A maturação destas áreas contribuirá para transformar a *blockchain* de uma solução emergente em uma infraestrutura consolidada de confiança, eficiência e sustentabilidade industrial

Bibliografia

Ahmed, S. F., Alam, M. S. bin, Hoque, M., Lameesa, A., Afrin, S., Farah, T., Kabir, M., Shafiullah, G. M., & Muyeen, S. M. (2023). Industrial Internet of Things enabled technologies, challenges, and future directions. *Computers and Electrical Engineering*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108847>

Agrawal, T. K., Kumar, V., Pal, R., Wang, L., & Chen, Y. (2021). Blockchain-based framework for supply chain traceability: A case example of textile and clothing industry. *Computers and Industrial Engineering*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107130>

Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>

Aoun, A., Ilinca, A., Ghandour, M., & Ibrahim, H. (2021). A review of Industry 4.0 characteristics and challenges, with potential improvements using blockchain technology. *Computers and Industrial Engineering*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107746>

Azevedo, P., Gomes, J., & Romão, M. (2023). Supply chain traceability using blockchain. *Operations Management Research*, 16(3), 1359–1381. <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00359-y>

Choi, T. M., Wallace, S. W., & Wang, Y. (2018). Big data analytics in operations management. *Production and Operations Management*, 27(10), 1868–1889. <https://doi.org/10.1111/poms.12838>

Chong, S. W., Jun, L. T., & Chen, Y. (2022). A methodological review of systematic literature reviews in higher education: Heterogeneity and homogeneity. *Educational Research Review*, 35, 100426. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2021.100426>

Casado-Vara, R., Prieto, J., la Prieta, F. de, & Corchado, J. M. (2018). How blockchain improves the supply chain: Case study alimentary supply chain. *Procedia Computer Science*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.193>

Enrique, D. V., Druczkoski, J. C. M., Lima, T. M., & Charrua-Santos, F. (2021). Advantages and difficulties of implementing Industry 4.0 technologies for labor flexibility. *Procedia Computer Science*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.177>

Esmailian, B., Sarkis, J., Lewis, K., & Behdad, S. (2020). Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resources, Conservation and Recycling*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105064>

Fan, D., Breslin, D., Callahan, J. L., & Iszatt-White, M. (2022). Advancing literature review methodology through rigour, generativity, scope and transparency. *International Journal of Management Reviews*, 24(2), 171–180. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12291>

Gad, A. G., Mosa, D. T., Abualigah, L., & Abohany, A. A. (2022). Emerging trends in blockchain technology and applications: A review and outlook. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(9), 6719–6742. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.03.007>

Harari, M. B., Parola, H. R., Hartwell, C. J., & Riegelman, A. (2020). Literature searches in systematic reviews and meta-analyses: A review, evaluation, and recommendations. *Journal of Vocational Behavior*, 118, 103377. <https://doi.org/10.1016/j.jvb.2020.103377>

Higgins, J. P. T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M. J., & Welch, V. A. (Eds.). (2019). *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Iannacci, J. (2018). Internet of things (IoT); internet of everything (IoE); tactile internet; 5G – A (not so evanescent) unifying vision empowered by EH-MEMS (energy harvesting MEMS) and RF-MEMS (radio frequency MEMS). *Sensors and Actuators, A: Physical*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.038>

Ivanov, D. (2020). Viable supply chain model: Integrating agility, resilience and sustainability perspectives—Lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03640-6>

Jovanovic, M., Kostić, N., Sebastian, I. M., & Sedej, T. (2022). Managing a blockchain-based platform ecosystem for industry-wide adoption: The case of TradeLens. *Technological Forecasting and Social Change*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121981>

Kshetri, N. (2018). 1 The Emerging Role of Big Data in Key Development Issues: Opportunities, Challenges, and Concerns. *Big Data for Development*, 5–33. <https://doi.org/10.1177/2053951714564227>

Liu, B., Si, X., & Kang, H. (2022). A literature review of blockchain-based applications in supply chain. *Sustainability*, 14(22), 15210. <https://doi.org/10.3390/su142215210>

Liu, J., & Zhang, L. (2023). The effect of blockchain technology on supply chain collaboration: A case study of Lenovo. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 18(3), 498–515. <https://doi.org/10.3390/jtaer18030026>

Lu, H., Huang, K., Azimi, M., & Guo, L. (2019). Blockchain technology in the oil and gas industry: A review of applications, opportunities, challenges, and risks. *IEEE Access*, 7. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907695>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Paul, J., Lim, W. M., O’Cass, A., Hao, A. W., & Bresciani, S. (2021). Scientific procedures and rationales for systematic literature reviews (SPAR-4-SLR). *International Journal of Consumer Studies*. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12695>

Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S., & Koh, S. C. L. (2020). Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 58(7). <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650976>

Rogerson, M., & Parry, G. C. (2020). Blockchain: case studies in food supply chain visibility. *Supply Chain Management*, 25(5). <https://doi.org/10.1108/SCM-08-2019-0300>

Santos, J., Figueiredo, A. S., & Vieira, M. (2019). Innovative pedagogical practices in higher education: An integrative literature review. *Nurse Education Today*, 72, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2018.10.003>

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>

Seuring, S., & Müller, M. (2018). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.08.014>

Shrimali, B., & Patel, H. (2022). Blockchain state-of-the-art: architecture, use cases, consensus, challenges and opportunities. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.08.005>

Tabatabaei, M., Vitenberg, R., & Veeraragavan, R. (2023). Understanding blockchain: Definitions, architecture, design, and system comparison. *Computer Science Review*, 48, 100582. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.100575>

Teodorescu, M., & Korchagina, E. (2021). Applying blockchain in the modern supply chain management: Its implication on open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/JOITMC7010080>

Tripathi, G., Ahad, M. A., & Casalino, G. (2023). A comprehensive review of blockchain technology: Underlying principles and historical background with future challenges. *Decision Analytics Journal*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100344>

Wang, Y., Han, J. H., & Beynon-Davies, P. (2019). Understanding blockchain technology for future supply chains: a systematic literature review and research agenda. *Supply Chain Management*, 24(1). <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0148>

Zhao, G., Liu, S., Lopez, C., Lu, H., Elgueta, S., Chen, H., & Boshkoska, B. M. (2019). Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research directions. *Computers in Industry*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.002>