



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

A influência dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular: Análise Bibliométrica

Sara Simão Gonçalves

Mestrado em Gestão

Orientadores:

Professor Doutor Leandro Luís Ferreira Pereira
Professor Associado com Agregação
ISCTE-IUL

Professor Doutor Rui Alexandre Henriques Gonçalves,
Professor Auxiliar Convidado
Iscte-IUL

Julho, 2024



Business
School

Departamento de Marketing, Operações e Gestão Geral

**A influência dos Sistemas Inteligentes nos processos de
Economia Circular das empresas: Análise Bibliométrica**

Sara Simão Gonçalves

Mestrado em Gestão

Orientadores:

Professor Doutor Leandro Ferreira Pereira
Professor Associado com Agregação
ISCTE-IUL

Professor Doutor Rui Alexandre Henriques Gonçalves,
Professor Auxiliar Convidado
ISCTE-IUL

Julho, 2024

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao meu pai e irmãos, pelo apoio e paciência que sempre me prestaram.

Agradeço também aos meus amigos e restantes docentes com que me cruzei nesta caminhada, por a enriquecerem com todos os vossos valiosos contributos.

Agradeço aos meus orientadores, pelo conhecimento, cuidado e atenção sempre que precisos.

Este trabalho é fruto do suporte que sempre recebi da vossa parte. A todos, o meu mais sincero obrigada.

Muito obrigada.

Resumo

A presente investigação, realizada através do método de análise bibliográfica recorrendo à base de dados *Elsevier Scopus*, tem como objetivo analisar de que forma os Sistemas Inteligentes e as suas tecnologias associadas influenciam nos processos de Economia Circular das empresas. Os benefícios da sua adoção ao nível do impacto ambiental, desenvolvimento de modelos de negócio inovadores, logística inversa em parceria com o alargamento do ciclo de vida do produto e redução de custos são evidentes e significativos, no entanto, esta adoção comporta desafios e pode ser dificultada por obstáculos sociais, económicos e tecnológicos. Desta forma, o estudo conclui que ao existir a capacidade de adesão a um modelo circular, abandonando o linear, pode comportar os benefícios e resultados esperados aquando da mudança do modelo económico em prática. Ainda, são listadas as condições a garantir por forma a espelhar os resultados que motivaram a adoção da Economia Circular com auxílio dos Sistemas Inteligentes.

Palavras-chave: Economia Circular; Sistemas Inteligentes; Inteligência Artificial; Ciclo de Vida dos Produtos; Sustentabilidade; Análise Bibliométrica.

Classificação JEL:

O32 – Management of Technological Innovation and R&D

Q01 – Sustainable Development

Abstract

This research, conducted through a bibliographic analysis by using the Elsevier Scopus database, aims to analyze how Intelligent Systems and their associated technologies influence companies' Circular Economy processes. The benefits of their adoption in terms of environmental impact, the development of innovative business models, reverse logistics in partnership with extending the product life cycle and reducing costs are evident and substantial. However, this adoption represents challenges and can be obstructed by social, economic and technological obstacles. Therefore, the study concludes that if there is the capacity to embrace a circular model, abandoning the linear one, it can provide the desired benefits and results when implementing a change in the economic model. In addition, are also listed the conditions to be guaranteed to fulfil the results that motivated the adoption of the Circular Economy with the help of Intelligent Systems.

Keywords: Circular Economy; Intelligent Systems; Artificial Intelligence; Products Life Circle; Sustainability; Bibliometric Analysis.

JEL Classification:

O32 – Management of Technological Innovation and R&D

Q01 – Sustainable Development

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Índice de figuras	ix
Índice de quadros	ix
Índice de acrónimos e siglas.....	xi
Capítulo 1. Introdução.....	1
Capítulo 2. Contextualização teórica	3
2.1. Questões de pesquisa.....	4
Capítulo 3. Metodologia	5
3.1. Identificação da pesquisa	5
3.2. Seleção da documentação a analisar	6
3.3. Critérios de seleção/pesquisa	6
Capítulo 4. Resultados gerais.....	9
4.1. Global Data Elsevier Scopus.....	9
4.1.1. Distribuição de documentos por ano	10
4.1.2. Distribuição de publicações por geografia	10
4.1.3. Distribuição de publicações por tipo de documento	11
4.1.4. Distribuição de publicações por áreas de estudo.....	11
4.2. Seleção de palavras-chave, estruturas e resultados	12
Capítulo 5. Síntese de artigos.....	15
Capítulo 6. Discussão e resultados.....	17
Q1: O que defende a literatura acerca da relação entre Sistemas Inteligentes e Economia Circular?	17
6.1.1. Sistemas Inteligentes	17
6.1.2. Economia Circular.....	18
6.1.3. Relação entre Sistemas Inteligentes e Economia Circular	19
Q2: Qual a aplicabilidade dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular e os seus principais desafios e benefícios associados?	21
6.1.4. Aplicabilidade de Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular	21
6.1.5. Desafios de aplicação	26
6.1.6. Benefícios de aplicação	28
Q3: Que condições são necessárias para maior adaptação dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular?	31

Capítulo 7. Conclusão	35
Capítulo 8. Referências bibliográficas	37
Anexo A. Síntese de artigos	43

Índice de figuras

Figura 1 – Distribuição de publicações por ano	10
Figura 2 – Distribuição de publicações por geografia.....	10
Figura 3 – Distribuição de publicações por tipo de documento	11
Figura 4 – Distribuição de publicações por área de estudo.....	12
Figura 5 – Seleção de palavras-chave	13
Figura 6 – Mapa VOSviewer com representação visual das principais palavras-chave	13
Figura 7 – Aplicação de Sistemas Inteligentes no modelo de Economia Circular	20

Índice de quadros

Quadro 1 – Clusters identificados de palavras-chave	14
Quadro 2 – Síntese de artigos.....	46

Índice de acrónimos e siglas

DL – *Deep Learning*

DT – *Digital Twin*

EC – Economia Circular

EL – Economia Linear

IA – Inteligência Artificial

IoT – *Internet of Things*

ML – *Machine Learning*

SI – Sistemas Inteligentes

Capítulo 1. Introdução

Estudos realizados por diferentes autores confirmam o aumento da adesão de Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular das empresas, sendo ainda possível comprovar a intensificação da relação de dependência entre a tecnologia digital e a promoção de diversas práticas empresariais (Seyyedi et al., 2024).

Visto isto, o principal objetivo deste trabalho de pesquisa passa, então, por perceber o que a literatura e documentação disponível revela sobre a aplicação e consequente influência dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular das empresas, assim como os desafios e benefícios associados, enunciando ainda quais as condições que cada entidade, seja esta empresarial ou governamental, terá de garantir para assegurar a sua correta aplicação e retorno de resultados esperados.

A Economia Circular é um conceito abrangente que promove essencialmente a retenção de valor económico e ambiental dos produtos, na tentativa de extensão do seu ciclo de vida. Nesta linha de pensamento, os produtos em final de vida – caracterizados como resíduos em modelos de Economia Linear, modelo a que se opõe à EC – devem ser encarados como um recurso disponível para reutilização e uma fonte de valor (Despeisse et al., 2021; Kvadsheim et al., 2021). Com o crescimento de literatura com foco na Economia Circular, os benefícios e aplicabilidade deste método tornam-se evidentes, no entanto, os processos ainda se regem essencialmente pelo método linear e, nas exceções verificadas, aplicam-se maioritariamente ao setor industrial.

A preocupação com o meio ambiente e retenção de valor dos produtos é visível também por parte instituições governamentais, tais como a União Europeia, estabelecendo, em 2015, objetivos de reutilização de água, comida e plástico, e a Assembleia Geral das Nações Unidas pela criação do plano que contém Objetivos de Desenvolvimento Sustentável com foco em diversas áreas de atuação e problemas sociais (Solanki et al., 2023; Anwar et al., 2024).

Por outro lado, a IA pode desempenhar 3 funções: *Sensing* (através do monitoramento e análise de mercado, identificando e prevendo mudanças no seu meio envolvente e nas preferências dos consumidores), *Seizing* (ao desenvolver produtos e serviços otimizando o uso de recursos enquanto promove a sustentabilidade, analisando e criando modelos de negócio inovadores) e *Reconfiguring* (dá-se o aumento da eficiência, sustentabilidade e adaptabilidade

das empresas para gerir as suas estratégias e operações em resposta às mudanças do mercado e avanços tecnológicos) (Sjödin et al., 2023, Awan et al., 2021; Niu et al., 2019).

A presente investigação encontra-se dividida em 7 partes principais.

A primeira parte (*Contextualização teórica*) trata de fazer uma enquadramento do tema, onde são apresentados alguns dos conceitos e teorias abordados ao longo do projeto.

Na segunda parte (*Metodologia*), é exposto o método de investigação ao qual se recorreu por forma a reunir as informações e dados necessário para o desenvolvimento da investigação com foco nos Sistemas Inteligentes e Economia Circular.

Os *Resultados gerais*, na terceira parte da investigação, apresentam os resultados obtidos através da base de dados *Elsevier Scopus* que forneceu a documentação a analisar e respetivos gráficos de informação, segundo diversos fatores. Já a aplicação *VOSviewer* foi aqui utilizada na medida de criação de um mapa de palavras-chave, representando-as visualmente permitindo a sua análise e de consequentes *clusters*.

A *Síntese de artigos*Resultados gerais surgem na quarta parte do documento, contém um quadro resumo dos artigos que mais se enquadram no tema e contribuiriam para a pesquisa.

A resposta às questões de pesquisa definidas dá-se na quinta parte do trabalho (*Discussão e resultados*). Neste capítulo, é possível encontrar o conteúdo encontrado na documentação selecionada para análise, tendo foco essencialmente no que a literatura revela sobre os dois temas em separado e a sua interligação. Ainda, relativamente às restantes questões de pesquisa, é enunciada a aplicação dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular em conjunto dos seus principais desafios e benefícios, assim como as condições necessárias para garantir esta aplicação com sucesso.

Na sexta e última parte (*Conclusão*), são descritas as conclusões finais, sintetizando as principais descobertas da análise efetuada.

Este projeto encontra-se redigido segundo a sétima edição da norma APA (*American Psychological Association*).

Capítulo 2. Contextualização teórica

Alusiva aos Sistemas Inteligentes e a sua evolução, surge a Indústria 4.0. Esta corresponde à quarta revolução industrial, isto é, a integração de tecnologias digitais avançadas no processo de produção (Paraschos et al. 2024; Bag e Pretorius, 2024; Halloui et al., 2022; Takhar e Liyanage, 2020).

Surgem, então, tecnologias como a IoT (dispositivos conectados e em constante comunicação), *robots* (como sistemas automatizados), *big data* (grande volume de dados e respetiva análise) e *blockchain* (tecnologia responsável pelo registo transparente e imutável das transações e fluxo dos produtos) (Kopeinig et al., 2024; Gebhardt et al., 2022).

Outros autores como Dwivedi et al. (2023) já abordam o tema da Indústria 5.0, que em comparação com a Indústria 4.0 acrescenta a personalização, criatividade humana e relação humano-máquina.

Quanto à Economia Circular, como já referido, traduz-se num modelo económico com o intuito de prolongar o ciclo de vida dos produtos, maximizando o seu valor associado, promovendo assim estratégias de reciclagem, reutilização e reaproveitamento total ou parcial (Bater et al., 2020; Tutore et al., 2024).

Segundo o Parlamento Europeu, apenas um terço do plástico produzido é alvo de processos de reciclagem, porém este plástico reciclado através de incineração representa aproximadamente 400 milhões de toneladas de dióxido de carbono. Esta baixa percentagem de reciclagem, representa em grandes perdas para a economia e ambiente do mundo. Foi estimado que o valor dos materiais com embalamento à base de plástico se reduza em 95% após o seu breve e único uso (Alonso et al., 2021; Mageto, 2022).

Rosário e Dias (2022) destacam alguns benefícios derivados da aplicação de Economia Circular nos processos, passando pela garantia de eficiência energética e redução de custos, gestão de resíduos e reaproveitamento, a par da transparência sustentável dos processos.

2.1. Questões de pesquisa

O presente estudo tem o objetivo de sumarizar e referir o apresentado na literatura selecionada, através do método de análise bibliométrica, no âmbito da investigação a incidir tanto nos Sistemas Inteligentes e Economia Circular enquanto temas individuais, como na relação destes dois.

Desta forma, procura-se responder às seguintes questões de pesquisa:

Q1: O que defende a literatura acerca da relação entre Sistemas Inteligentes e Economia Circular?

Q2: Qual a aplicabilidade dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular e os seus principais desafios e benefícios associados?

Q3: Que condições são necessárias para maior adaptação dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular?

Capítulo 3. Metodologia

3.1. Identificação da pesquisa

O estudo aqui presente rege-se-á por uma análise bibliométrica, com o intuito de recolher informação presente na literatura disponível o que concerne ao tema em análise, assim como contribuir para a investigação e apoiar futuras pesquisas. Assim, recorrer-se-á ao *Elsevier Scopus* na função de base de dados e ao *VOSviewer* para analisar os resultados obtidos.

Este tipo de análise permite analisar a literatura disponível numa determinada base de dados, identificando ainda tendências de interesse e pesquisa, os autores ou entidades mais influentes, assim como redes de colaboração no tema em questão, o que torna o investigador capaz de recolher informação pertinente, podendo este, por consequência, contribuir para avanços científicos ou perceber lacunas na pesquisa, estudando a dimensão que o seu contributo poderá ter no determinado assunto, entre outros (Zupic & Cater, 2015; Niu et al., 2019).

Apesar de ser um método importante na análise e desenvolvimento de pesquisas, providenciando *insights* valiosos, pode ver-se limitado, por exemplo, pela possível baixa qualidade ou abrangência da informação da base de dados utilizada ou pela preferência por determinado idioma ou autor.

Estes autores referem ainda que a pesquisa pode, então, ocorrer segundo diversos métodos, destacando-se a *Análise de Citação* (incide na frequência e no impacto que esta tem em artigos, autores ou revistas), *Análise de Co-Citação* (através da identificação da frequência com que dois artigos são citados, torna-se possível perceber a relação entre áreas de pesquisa), *Análise de Co-Autoria* (tem como objetivo reconhecer redes de colaboração entre investigadores) e *Análise de Palavras-Chave* (destaca temas emergentes e padrões de pesquisa tendo em conta a frequência com que estas palavras-chave são referidas).

De forma a responder às questões acima referidas, esta investigação seguirá o seguinte processo:

1. Definição das questões de pesquisa;
2. Pesquisa e seleção de documentação a analisar;
3. Avaliação da qualidade e relevância da documentação a analisar;
4. Análise da informação recolhida;
5. Apresentação de resultados.

3.2. Seleção da documentação a analisar

A documentação utilizada neste estudo foi obtida na plataforma de dados *Elsevier Scopus*, onde inicialmente foi estabelecida uma relação entre 4 palavras-chave e posteriormente aplicada uma filtragem, como se irá descrever no capítulo seguinte, procurando-se congregar um conjunto de documentação relevante para análise.

A importância desta fase prende-se com a correta identificação dos artigos que melhor contribuem para a resposta às questões de pesquisa definidas. Com a análise mais detalhada da documentação, com foco no seu conteúdo, o número da amostra selecionada inicialmente viu-se a ser diminuído, com o intuito de manter apenas a mais relevante e pertinente para o estudo em causa.

3.3. Critérios de seleção/pesquisa

Os artigos foram analisados utilizando a Metodologia PRISMA. A metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) traduz-se numa diretriz abrangente para a condução e descrição de revisões sistemáticas e meta-análises em várias áreas, incluindo a análise bibliométrica. Moher et al. (2009) introduziram inicialmente a Declaração PRISMA, fornecendo uma estrutura para os investigadores garantirem a transparência e a integridade na apresentação das suas descobertas.

A atualização PRISMA 2020, de acordo com Page et al. (2021), refina e aprimora os padrões de descrição, oferecendo orientações atualizadas para autores de revisões sistemáticas e editores. A metodologia PRISMA compreende várias etapas-chave, incluindo o (1) Planeamento, (2) Pesquisa Bibliográfica, (3) Seleção dos Estudos, (4) Extração de Dados, (5) Avaliação da Qualidade, (6) Síntese de dados, (7) Apresentação dos resultados e, por fim, (8) Discussão e Conclusão.

Visto isto, seguiram-se os seguintes critérios de pesquisa, que resultou numa seleção de 134 publicações a analisar:

1. Recorrer à base de dados *Elsevier Scopus*;
2. O ano de publicação não sofreu qualquer restrição, de modo a perceber a evolução de ideias e contributos ao longo do tempo, iniciando-se no seu surgimento;
3. À semelhança do ano de publicação, o tipo de documento também não se viu limitado, havendo diversidade neste ponto;

4. Já a *Área de Investigação* foi limitada a “*Computer Science*”, “*Business, Management and Accounting*”, “*Decision Sciences*” e “*Economics, Econometrics and Finance*”.
5. Quanto às palavras-chave da documentação ao dispor, foram selecionadas as “*Circular Economy*”, “*Artificial Intelligence*”, “*Sustainable Development*”, “*Sustainability*”, “*Supply Chain Management*” e “*Industry 4.0*”.
6. Por fim, quanto ao idioma, foi selecionado o *inglês*.

Após análise aprofundada de *abstracts* e conteúdo, foram então selecionados 60 documentos para auxílio na resposta às questões de pesquisa definidas.

Capítulo 4. Resultados gerais

4.1. *Global Data Elsevier Scopus*

Na base de dados *Elsevier Scopus*, como já referido, foram referenciadas como palavras-chave nesta pesquisa “Circular Economy”, “Management”, “Artificial Intelligence” e “Intelligent Systems”.

É de salientar que, ao contrário das verificadas nas restantes palavras-chave, a relação definida entre as últimas duas foi de “OU” (“OR”) e não “E” (“AND”), como se pode verificar na expressão devolvida pela base de dado. Esta decisão justifica-se pela tentativa de abrangência do tema em estudo, de forma a reunir o máximo de documentação relevante possível, dentro da temática em questão, sabendo que os temas são complementares.

(*TITLE-ABS-KEY (circular AND economy) AND TITLE-ABS-KEY (management) AND TITLE-ABS-KEY (artificial AND intelligence) OR TITLE-ABS-KEY (intelligent AND systems)*)

Este primeiro passo de definição de palavras-chave resultou numa base de dados composta por 326 documentos.

A filtragem aplicada, já abordada anteriormente, formou uma base de dados com 134 publicações para analisar, gerando a seguinte expressão:

(*TITLE-ABS-KEY (circular AND economy) AND TITLE-ABS-KEY (management) AND TITLE-ABS-KEY (artificial AND intelligence) OR TITLE-ABS-KEY (intelligent AND systems) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "comp") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "busi") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "deci") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "econ")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "circular economy") OR LIMIT TO (EXACTKEYWORD , "artificial intelligence") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "sustainable development") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "sustainability") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "supply chain management") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "industry 4.0")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "english"))*)

4.1.1. Distribuição de documentos por ano

Como se pode constatar na figura 1, os temas em estudo encontraram-se pela primeira vez em 2007, tendo-se registado um aumento de publicações mais acentuado a partir do ano de 2017. O pico de publicações deu-se em 2023, com 87 registos.

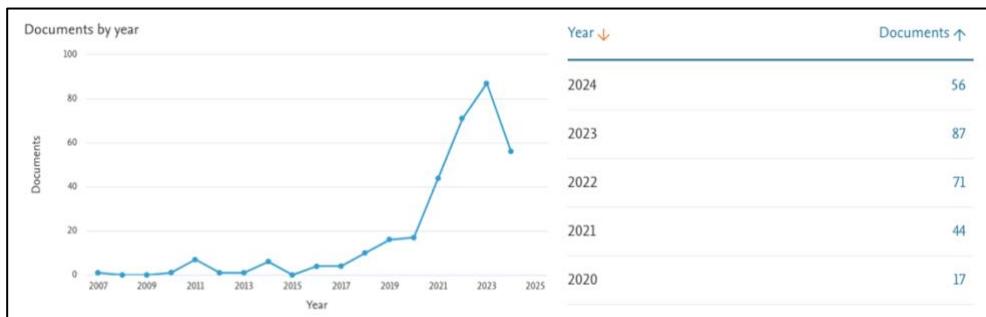


Figura 1 – Distribuição de publicações por ano

Fonte: Elsevier Scopus, 2024

Assumindo a tendência crescente no comportamento das publicações que se verifica desde 2020, será possível assumir que na segunda metade de 2024 serão publicados documentos suficientes para se registrar um novo pico de publicações este ano. Este aumento de publicações poderá derivar da preocupação emergente com a poupança de recursos e da adesão que as empresas e o mundo têm demonstrando em relação à Inteligência Artificial e Sistemas Inteligentes nos mais diversos processos.

4.1.2. Distribuição de publicações por geografia

Quanto à origem das publicações em análise, estas provêm principalmente da China e Índia, sendo que cada país lidera com 43 publicações que se enquadrem na investigação. A completar o *top5*, seguem-se o Reino Unido, Estados Unidos da América e Itália (figura 2). Portugal contribuiu, até à data, com 5 documentos para a pesquisa.

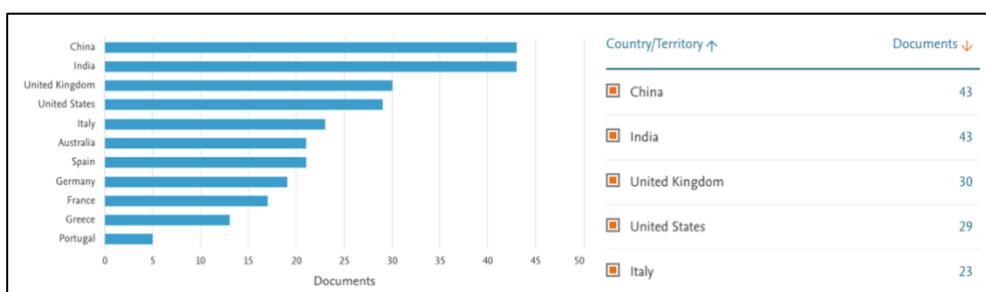


Figura 2 – Distribuição de publicações por geografia

Fonte: Elsevier Scopus, 2024

4.1.3. Distribuição de publicações por tipo de documento

Do total de 386 artigos frutos da pesquisa parametrizada, 120 (36,8%) correspondem a artigos (“*Articles*”, nos gráficos presentes na figura 3), sabe-se ainda que o segundo tipo de documento mais frequente é o Artigo de Conferência (“*Conference paper*” na figura já mencionada), pesando 26,1% da base de dados disponível.

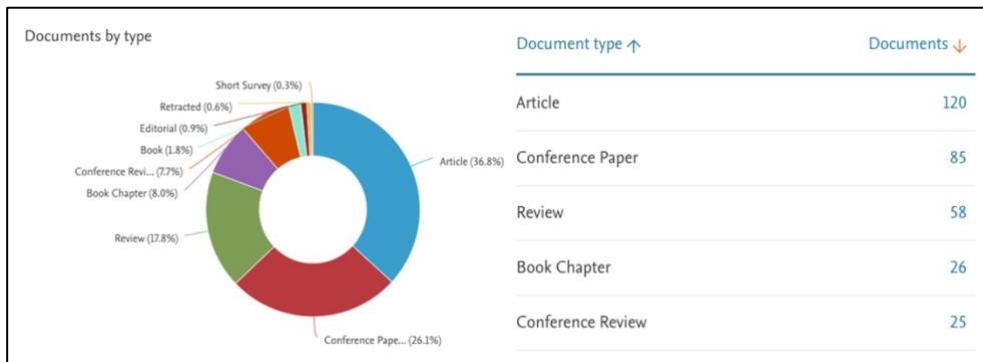


Figura 3 – Distribuição de publicações por tipo de documento

Fonte: Elsevier Scopus, 2024

4.1.4. Distribuição de publicações por áreas de estudo

É possível confirmar pela figura 4, que a área de estudo com maior presença é a de Ciência Ambiental (“*Environmental Science*” na figura) com 126 publicações associadas, o que corresponde a cerca de 17%, que se segue pela área de Informática ou Ciências da Computação (“*Computer Science*” na figura, tendo associados 119 publicações) e após esta a área de Engenharia (“*Engineering*” da figura abaixo representada em 114 ou 15,5% das publicações). Já Negócios, Gestão e Contabilidade (traduzida de “*Business, Management e Accounting*”, da mesma figura) surge na 4.^a posição deste *ranking*, marcando presença em sensivelmente 10% das publicações (ou 72, em termos absolutos).

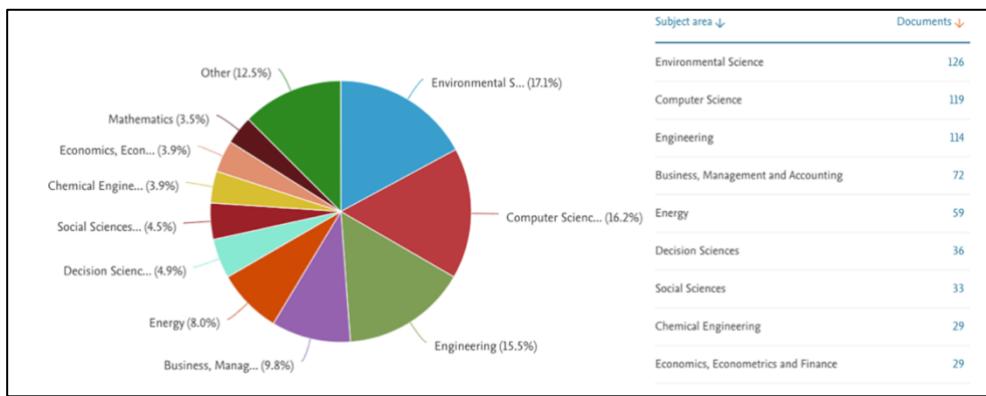


Figura 4 – Distribuição de publicações por área de estudo

Fonte: Elsevier Scopus, 2024

4.2. Seleção de palavras-chave, estruturas e resultados

Como anteriormente referido, foi efetuada uma extração do *Elsevier Scopus* a conter 134 publicações para análise.

Nesta fase da análise, recorreu-se à aplicação *VOSviewer* para se analisar a coocorrência das palavras-chave das publicações extraídas.

Sabendo que *VOS* significa *Visualização de Semelhanças* – traduzido livremente de “*Visualization of Similarities*” (Van Eck & Waltman, 2010, p. 524) –, este *software* permite construir e visualizar mapas relacionando palavras-chave, sejam estas nomes de autores, termos nos títulos ou palavras-chave da publicação, por exemplo, para consequente análise. Este oferece a opção de construir mapas de coocorrência, o que se deu no decorrer desta investigação, por forma a mapear a frequência com que 2 termos são aplicados em conjunto numa base de dados, permitindo identificar padrões ou tendências emergentes. Estes mapas devolvidos pelo *software* têm como vantagens a rápida compreensão visual das relações identificadas entre os diferentes termos selecionados, originando *clusters*, e ainda o comportamento da relação entre tópicos eleitos ao longo do tempo.

No *software* foi, então, selecionado um mínimo de ocorrências que cada palavra-chave teria de cumprir como requisito (ver figura 5), verificando-se a seleção por parte do programa de 54 palavras-chave a mencionar no mapa de relações entre palavras-chave, das 1417 disponíveis.

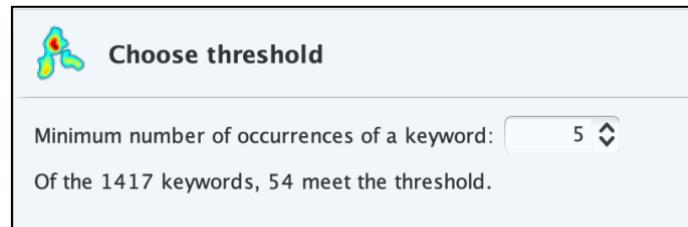


Figura 5 – Seleção de palavras-chave

Fonte: VOSviewer, 2024

O mapa que resultou do funcionamento deste *software*, presente na figura 6, apresenta as relações estabelecidas entre as palavras-chave detetadas. A dimensão de cada termo é diretamente proporcional ao número de vezes que esta se regista, isto é, no mapa destacam-se as palavras-chave “*Circular Economy*” com 97 ocorrências e “*Artificial Intelligence*” com 78.

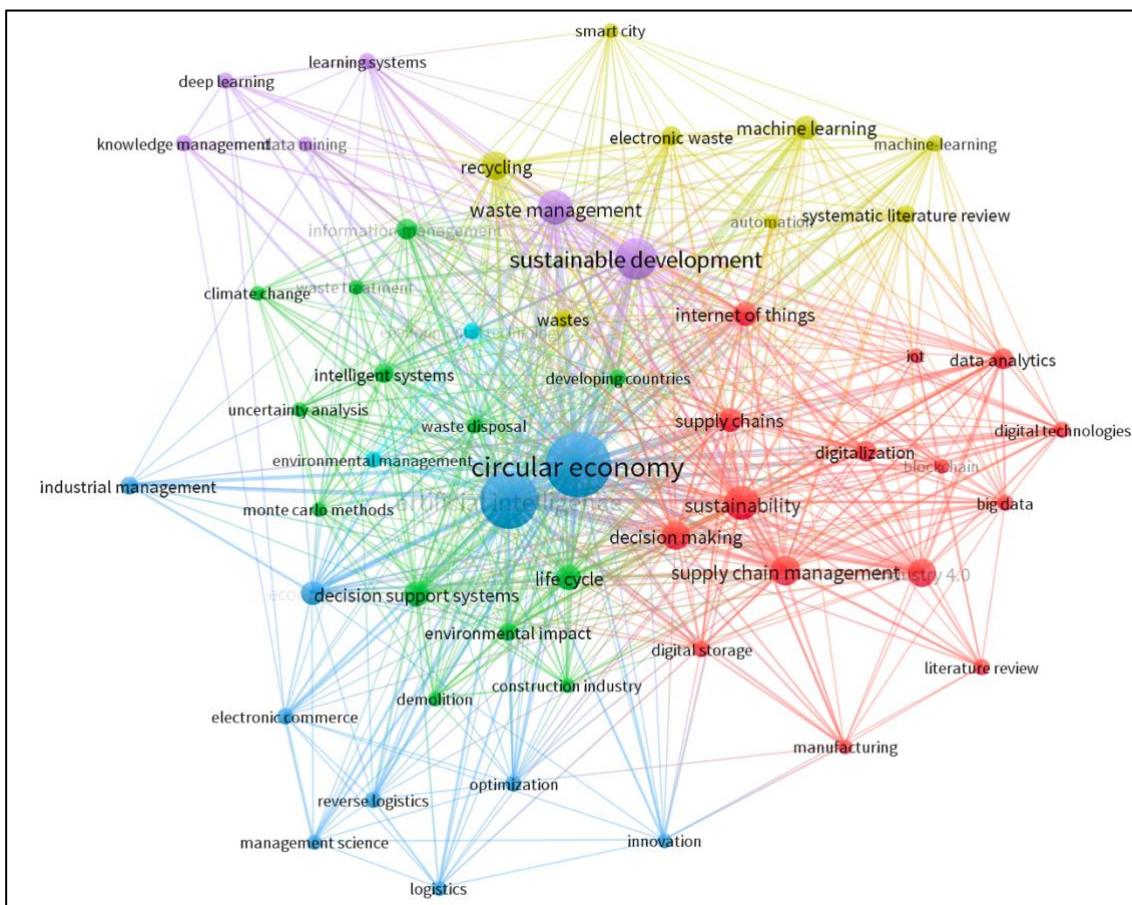


Figura 6 – Mapa VOSviewer com representação visual das principais palavras-chave

Fonte: VOSviewer, 2024

Através de análise da figura, é também possível identificar 6 *clusters*, cada um correspondendo a uma cor. Os *clusters* determinam a correlação entre os termos, identificando os conjuntos de palavras-chave que surgem de forma mais regular em simultâneo (Van Eck & Waltman, 2010).

Cluster 1	<i>Big Data, Blockchain, Data Analytics, Decision Making, Digital Storage, Digital Technologies, Digitalization, Industry 4.0, Internet of Thing, Iot, Literature Review, Manufacturing, Supply Chain Management, Supply Chains e Sustainability.</i>
Cluster 2	<i>Climate Change, Construction Industry, Decision Support Systems, Demolition, Developing Countries, Environmental Impact, Information, Management, Intelligent Systems, Life Cycle, Monte Carlo Methods, Uncertainty Analysis, Waste Disposal e Waste Treatment.</i>
Cluster 3	<i>Artificial Intelligence, Circular Economy, Economics, Electronic Commerce, Industrial Management, Innovation, Logistics, Management Science, Optimization e Reverse Logistics.</i>
Cluster 4	<i>Automation, Electronic Waste, Machine Learning, Machine-Learning, Recycling, Smart City, Systematic Literature Review e Wastes.</i>
Cluster 5	<i>Data Mining, Deep Learning, Knowledge Management, Learning Systems, Sustainable Development e Waste Management.</i>
Cluster 6	<i>Environmental Management e Environmental Technologies.</i>

Quadro 1 – Clusters identificados de palavras-chave

Fonte: Adaptado de VOSviewer, 2024

Após análise do mapa *VOSviewer* e os *clusters* retirados, pretende-se que a pesquisa se debruce sobre os *clusters* 1, 2, 3, 4 e 5, visto que incluem palavras-chave que mais se relacionam com as questões de pesquisa selecionadas para esta investigação. Já o *cluster* 6 é excluído por se enquadrar mais com questões ambientais, algo que não é foco nesta tese.

Capítulo 5. Síntese de artigos

Após análise dos *cluster* e das palavras-chave, enunciados anteriormente, deu-se a seleção 34 principais artigos que melhor respondem às questões de pesquisa e aos objetivos da investigação.

A seleção derivou da leitura e análise de *abstracts* de todos os documentos extraídos do *Elsevier Scopus*, onde se pré-selecionou os artigos mais relevantes para a pesquisa. Com uma análise mais profunda do conteúdo, foi possível, então comprovar a sua efetiva relevância e contributo para a recolha de informação.

A seleção dos artigos, composto pelo ano, autor, título, palavras-chave estão expostas no quadro 2, em anexo ao documento.

No quadro é possível verificar, após uma análise superficial dos títulos e palavras-chave, que as investigações mencionadas têm foco no recurso à IA e às suas tecnologias para incentivar a adesão ao modelo circular e promover a adoção de estratégias mais sustentáveis, evidenciando a otimização da gestão de recursos (nomeadamente através da reciclagem) e a eficiência da cadeia de abastecimento. Os estudos defendem que a digitalização é crucial para adotar práticas sustentáveis e o aparecimento de modelos de negócios circulares e inovadores, propondo *frameworks* para conseguir aplicar estes modelos tecnológicos.

As conclusões dos estudos citados consideram a Indústria 4.0 como essencial para alcançar as metas de desenvolvimento sustentável e promover uma economia mais circular e robusta.

Capítulo 6. Discussão e resultados

Q1: O que defende a literatura acerca da relação entre Sistemas Inteligentes e Economia Circular?

6.1.1. Sistemas Inteligentes

John McCarthy, pioneiro no campo da IA, introduziu este conceito como “*a ciência e engenharia que desenvolve máquinas inteligentes ou programas de computador*” que “*permite a utilização de inteligência, algoritmos, assistência e automação para executar tarefas além das capacidades humanas*” (Anwar et al., 2024, p. 10). Estes sistemas aprendem principalmente a partir de números, imagens, áudio e vídeo, com vista na redução do erro e desenvolvimento de modelos inteligentes precisos. Dentro deste conceito, podem destacar-te modelos de *machine-learning (ML)*, *data mining* e *deep learning (DL)*. Outras técnicas em desenvolvimento neste campo são *robots*, *drones*, dispositivos inteligentes e sensores, *chatbots* e processamento de linguagem neuronal (PLN) (Anwar et al., 2024; Schoitsch, 2023; Mageto, 2022; Nikitaeva e Dolgova, 2023).

Os algoritmos no âmbito do ML permitem ter acesso, analisar, classificar e prever dados, ao passo que os desenvolvidos através de DL têm como base Redes Neuronais, almejando replicar os circuitos neuronais do cérebro com vista ao processamento de dados e identificação/criação de padrões nos dados em análise, tomando decisões para tal. Já os *robots* e *drones* podem substituir os humanos em tarefas complexas que seriam consideradas perigosas ou complicadas para o ser humano. Os dispositivos inteligentes e sensores têm foco na monitorização em tempo real e na interação com outros dispositivos na rede de conexões sem fios (que faz menção à IoT e sincronização de informação nos aparelhos associados). Os serviços de atendimento ao cliente, por exemplo, são apoiados por *chatbots*, que optimizam estes serviços enquanto conduzem um diálogo fundamentado e organizado com os utilizadores. Por fim o PNL foca-se no estabelecimento da comunicação entre computadores e humanos, ao analisar e interpretar a estrutura e intenções das frases humanas, que apoia a tomada de decisão e a organização de dados não estruturados – um exemplo de ferramenta baseada no PNL é o *ChatGPT (Chat Generative Pre-Trained Transformer)*.

Aqui, surge ainda o conceito de *Digital Twin*, que, ao se apoiar na conexão entre o mundo virtual e o mundo físico assim como no fluxo de informação entre estes, corresponde à simulação virtual dos dois mundos, com o objetivo de auxiliar a monitorização de informações,

a previsão de acontecimentos (como problemas ou algum obstáculo que possa surgir no processo) e tomada de decisão.

Silva e Morais (2021) contribuem com uma nova ferramenta para o estudo, o *Sistema de Apoio à Decisão de Grupo* (GDSS), que se preocupa com a recolha de *inputs* dos *stakeholders* envolvidos na tomada de decisão. Esta tomada de decisão é auxiliada pela ferramenta, na medida em que o sistema recorre a técnicas de modelagem, simulação e análise por forma a facilitar a colaboração e comunicação dos interessados pela partilha de opiniões, reduzindo também a possibilidade de conflitos.

O recurso a funções matemáticas é apresentado nesta investigação por Foussard et al. (2021). Estes autores desenvolvem fórmulas com base no Modelo *Lot-Sizing*, isto é, com base num método que determina a dimensão ideal dos lotes de produção por forma a planejar corretamente a quantidade de manutenção a ser realizada em determinados intervalos, tendo em consideração a procura dos produtos e os recursos disponíveis. Este modelo começa por ser alimentado com dados sobre a condição dos equipamentos de manutenção, histórico deste processo, capacidade de recursos e custos associados, gerando uma *função objetivo*, que procura minimizar custos associados à manutenção, sejam estes no âmbito da paragem de produção, de recursos e inventário de peças de reposição, e uma *função custo*, englobando os custos fixos e variáveis associados a estes processos.

6.1.2. Economia Circular

A EC surge em oposição à Economia Linear (EL) (Anwar et al., 2024; Silva e Morais, 2021; Despeisse et al., 2021; Stable et al., 2023). A EL é caracterizada pela falta de preocupação/foco no ciclo de vida dos produtos, onde quando estes atingem a fase final do seu ciclo de vida, são apenas descartados, contribuindo para a utilização, e consequente escassez, de recursos, eventualmente acumulando resíduos, havendo a possibilidade de crescimento de custos e aumento dos níveis de poluição. Já uma EC rege-se pela sustentabilidade, isto é, comporta a preocupação de criação de relações sustentáveis entre a sociedade e a natureza (como fonte de recursos e matérias-primas), promovendo um ciclo de utilização *circular*. A EC segue um ciclo fechado, em que após a utilização do produto não se segue necessariamente o fim do seu ciclo de vida. Neste modelo circular, é promovido um sistema de produção, utilização e reutilização

(Mejía-Moncayo et al., 2021), procurando preservar o valor do produto pelo maior tempo possível (Rusch et al., 2023).

Este modelo tem como pilares fundamentais 3 princípios, sendo estes (1) Eliminação de resíduos e poluição, (2) Maximização do seu ciclo de circulação de produtos e matérias-primas e, por fim, (3) Regeneração da natureza. Rege-se ainda pelos princípios básicos R (reciclar, reduzir, reutilizar, recuperar, renovar, regenerar, redesenhar, remanufaturar e recriar).

6.1.3. Relação entre Sistemas Inteligentes e Economia Circular

Tutore et al. (2024) apresenta 4 modelos que apoiam a relação entre SI e EC.

O primeiro – *Automação e Eficiência* – trata de referir a importância da automação e otimização os processos, que leva à redução de desperdício através da análise preditiva e construção de algoritmos avançados.

O segundo – *Reciclagem e Reutilização* – passa por incluir classificação e processamento de resíduos (algo também defendido por outros diversos autores como Alonso et al., 2024 e Niu et al., 2019) na triagem e categorização do tipo de resíduo, por exemplo, onde a IA tem o papel fundamental de o identificar com maior precisão possível e contribuir com soluções a nível do *design* dos novos produtos que contribuam positivamente, na ótica da sustentabilidade, para um processo de desmontagem e reciclagem que facilite o seu futuro reaproveitamento.

Ainda, no terceiro modelo – *Inovação e Desenvolvimento* (I&D) – os autores sugerem que a IA pode acelerar o processo de I&D de novos materiais e processos com vista a promover uns mais sustentáveis e alinhados com os princípios associados à EC. A IA neste modelo permite, então, simular através da modelação digital os possíveis resultados de tal estratégia, o que permite diminuir riscos e otimizar resultados, enquanto se poupa recursos, principalmente financeiros e temporais.

Já o último modelo – *Monitorização e Gestão* – aborda temáticas como o fornecimento de ferramentas que tenham a capacidade de análise de grande volume de dados, levando a uma gestão fundamentada que identifica oportunidades de melhoria contínua.

Anwar et al. (2024) relacionam no seu trabalho, ao enunciar os elementos em cada tópico, as áreas de atuação em que esta relação poderá surtir efeitos e contribuir de forma positiva (Figura 7 – Aplicação de Sistemas Inteligentes no modelo de Economia Circular).

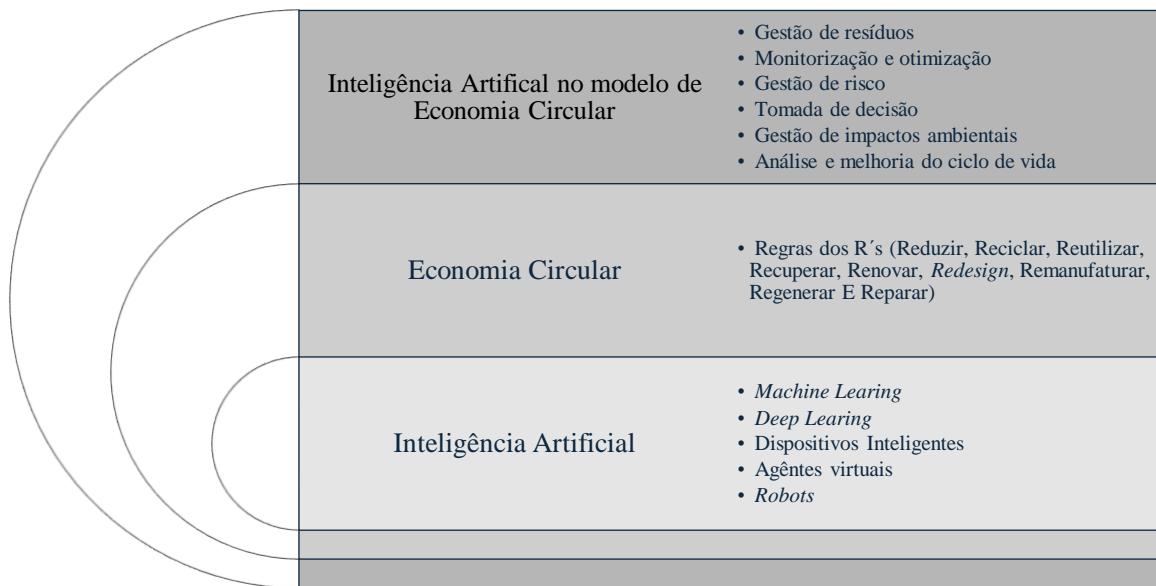


Figura 7 – Aplicação de Sistemas Inteligentes no modelo de Economia Circular

Fonte: Adaptado de Anwar et al. (2024)

Desta forma, ao longo da presente investigação, procura-se abordar os tópicos aqui destacados pelos autores.

O recurso ao *Sistema de Apoio à Decisão de Grupo* (GDSS), apresentado por Silva e Morais (2021), pode contribuir para a transição de uma EL para uma EC, pois este permite a tomada de decisão informada e ponderada imparcialmente, uma vez que esta é feita pelo sistema que tem em consideração diversos fatores como o custo, eficiência e impacto ambiental, e não por um elemento humano. Este permite também a criação de diversos cenários, à semelhança dos DT, apresentando como vantagem a facilidade na colaboração e coordenação de esforços, esperando uma comunicação e partilha de informações entre os *stakeholders*. Este sistema comporta também o obstáculo associado à sua implementação e adaptação, onde se nota mais uma vez a diferença entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, visto que as tecnologias disponíveis nestes territórios podem não coincidir ao nível desejado. A par deste desafio, é novamente referido o custo associado ao constante *update* do sistema por forma a certificar que o mesmo se encontra atualizado.

No âmbito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, apresentados e promovidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas, a IA é capaz de auxiliar no alcance de todos os estabelecidos (Anwar et al., 2024; Despeisse et al., 2021; Solanki et al., 2023).

Q2: Qual a aplicabilidade dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular e os seus principais desafios e benefícios associados?

6.1.4. Aplicabilidade de Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular

De acordo com Seyyedi et al. (2024), vários autores estudaram a aplicabilidade da correlação *Sistemas Inteligentes-Economia Circular* no âmbito da relação com a indústria automóvel, no desenvolvimento de objetivos sustentáveis, a nível da gestão circular das cadeias de abastecimento, embalamento do produto aquando da promoção de uma sustentabilidade circular e inteligente, gestão de resíduos, processos e métodos de construção civil, entre outras áreas. Anwar et al. (2024) destacam como áreas de aplicação destes sistemas no modelo circular em estudo as áreas da agricultura, educação, ciência, medicina, finanças, *marketing*, gestão, mercado de ações e economia.

Gestão de Resíduos

No âmbito da gestão de resíduos, Baker et al. (2020), Niu et al. (2019). Noman et al. (2022) referem que organizações com foco neste tema reconhecem a importância da criação de um *Sistema de Gestão de Resíduos*, com auxílio de SI e IA, que promova também um processo de separação/desmontagem que assegure a sustentabilidade ou estimule a produção influenciada pelo *eco-design*.

Este reconhecimento e programação de ações, intimamente relacionados com o *Sistema de Gestão de Resíduos*, passa por permitir a recolha de resíduos, identificando padrões de produção dos mesmos enquanto avalia o estado/condição dos materiais e recursos recolhidos (Baker et al., 2020; Züst et al., 2021; Elghaish et al., 2022; Schoitsch, 2023). Alanya-Beltran et al. (2022) e Munin et al. (2023) complementam esta ideia, referindo a intervenção obrigatória da IoT, que contribui para um *Sistema de Gestão de Resíduos* à base de sensores inteligentes e consequentes sistemas de gestão numa *cloud* para análise e controlo dos resultados registados nestes equipamentos, por forma a obter relatórios que servem a função de histórico e conteúdo que permite a melhoria e aperfeiçoamento deste sistema.

Ainda no foco de Baker et al. (2020), relacionado com resíduos eletrónicos derivados de *smartphones* descartados, e fazendo menção a exemplos práticos reais, debruçamo-nos sobre um grande fabricante destes aparelhos, a *Apple*, que desenvolveu dois *robots* (*Liam* e *Daisy*) capazes de recuperar todos os materiais utilizados na produção dos *smartphones*. A *Apple* afirma que a *Daisy* tem a capacidade de separar os materiais de 2 milhões de dispositivos por ano e reciclá-los automaticamente, promovendo um ciclo de produção fechado, característica

de uma EC. Para além da *Apple* – ou *Samsung* e *Huawei*, que promovem igualmente planos no mesmo sentido –, podem ser ainda apresentados os casos da *Google*, *LG*, *ShiftPhone* e *FairPhone*, com os seus *smartphones* modulares considerados casos exemplares de um *design* sustentável com alta durabilidade, apresentando facilidade na recuperação dos materiais utilizados na sua produção (sabendo ainda que esta recorreu a substâncias menos nocivas) e uma garantia a rondar os 5 anos.

Construção Civil

A interligação entre SI e a *Simulação de Monte Carlo* (técnica estatística que recorre a amostras aleatórias por forma a estimar o funcionamento/comportamento de sistemas complexos caracterizados pela incerteza) surge da investigação de Züst et al. (2021) e Jaouhari e Arif (2024) no âmbito da construção civil. Aqui, estes sugerem a aplicação de DT e a *Simulação de Monte Carlo* na análise e previsão dos padrões de fluxos de utilização de matérias-primas, permitindo identificar possíveis soluções ou alternativas com vista à otimização e gestão dos resíduos provenientes dos processos de construção civil e demolição.

Os autores apelam ainda à utilização de tecnologias de Realidade Aumentada (AR) e Realidade Virtual (VR), que auxiliam nos processos de *design* e desenvolvimento de protótipos, ao existir a hipótese de construir tal protótipo num modelo virtual, reduz possíveis desperdícios e custos associados ao mesmo processo, caso este fosse tornado realidade fisicamente. Por outro lado, estas tecnologias de AR e VR possibilitam ainda o treino virtual e interativo por parte dos trabalhadores, por exemplo, ao erradicar qualquer questão relacionada com perigo ou ameaça de segurança.

Agricultura

Outro campo de estudo e aplicação do processo de EC baseado em SI é a agricultura. Esta enfrenta desafios como o aumento da população, escassez de recursos (principalmente água, energia e espaço de cultivo), alterações climáticas, poluição, produção de desperdício e perda de biodiversidade, contribuindo assim para parte do insucesso a nível da sustentabilidade e desenvolvimento socioeconómico. Aqui, são aplicadas estratégias de EC no âmbito técnico e biológico. Em toda a sua cadeia, desde a sua estratégia de produção até venda ao consumidor final, é aplicado um sistema baseado nos R's (nomeadamente os “Reciclar” e “Reutilizar”), através de, por exemplo, repensar o *design* e método de embalamento de produtos. A nível

biológico, por outro lado, este ciclo é sustentado pela recuperação de valor dos resíduos produzidos.

Baseado num modelo *end-to-end*, característico deste modelo circular, Andono et al. (2022) apresentam a aplicação de SI no caso prático e real de cultivo. Sugerem, então, o recurso a dispositivos que controlem o crescimento e saúde das plantas, assim como a qualidade e condições do solo e clima. Os SI ganham importância neste tema através da IoT que permite atomizar processos, tais como irrigação, fertilização e monitoração dos aspetos já referidos.

Logística e Cadeias de Abastecimento

A aplicação de SI nos processos de EC em momentos de crise, nomeadamente na crise de COVID-19, está refletida no estudo de Ismail (2023). Este autor refere alguns dos acontecimentos derivados do impacto da paralisação proveniente das medidas tomadas com vista ao impedimento da propagação do vírus. Começa por abordar o tema da interrupção da cadeia de fornecimento, passando pelo fecho de instalações de reciclagem, dificuldade na implementação de práticas sustentáveis e foco na gestão da crise sanitária, que implicou o desvio da preocupação dos processos a favor da sustentabilidade. O autor investiga, então, o processo BIM (Modelagem da Informação da Construção) e o seu potencial poder de suprimir as necessidades referidas.

Mejía-Moncayo et al. (2021) surgem nesta investigação com a sugestão de uma arquitetura híbrida com a contribuição do *Sistema de Manufatura Reconfigurável*. Este sistema comporta a rápida adaptação a oscilações de produção e consumo, assim como nas características de fabrico de um determinado produto. O sistema apresentado comporta unidades modelares com foco nas diversas etapas de produção, desde o seu início com seleção de matérias-primas, ao seu fabrico/montagem e, por fim, ao embalamento final. Ao longo desta cadeia existe uma plataforma de integração, apelando mais uma vez à IoT, onde se dá a partilha de informação recolhida ao longo do ciclo de produção.

A IoT é associada à monitorização contínua, em tempo real, dos produtos e do seu ciclo de vida, através de sensores e dispositivos conectados que recolhem informação relativa à condição, localização e utilização dos produtos, auxiliando na gestão eficiente dos mesmos e na previsão de manutenção necessária. A IoT, em parceria com tecnologias de *blockchain*, permite o rastreio dos materiais e permite acompanhar o local de origem e destino dos materiais ao longo da cadeia de abastecimento – registo e transparência necessários para o cumprimento

de práticas éticas e sustentáveis, bem como garantir a conformidade regulatória (Elghaish et al., 2022; Rusch et al., 2023; Hau et al., 2023; Rajeb et al., 2022; Chaouni Benabdellah et al., 2021).

Ainda no âmbito da gestão de cadeia de abastecimento, diversos autores (Alanya-Beltran et al., 2022; Winarno et al., 2023; Awan et al., 2021; Mukherjee et al., 2024; Dey et al., 2023; Schoitsch, 2023; Mageto, 2022; Liu et al., 2023; Noman et al., 2022) realçam a otimização de rotas de recolha e distribuição de materiais, através de tecnologias como ML, sensores IoT e análise de *big data* por forma a identificar padrões de tráfego, condições climáticas e outras variáveis de condicionem o transporte de mercadorias, promovendo a sustentabilidade e redução de custos. Este controlo serve também para a supervisão dos veículos de transporte, percebendo a disponibilidade dos mesmos e o desgaste derivado da sua utilização, prevendo quaisquer falhas que possam surgir e criar obstáculos de transporte.

Gróf e Netland (2021) sugerem a criação de um sistema de produção pós-venda, englobando as atividades e processos de manutenção, reparo, remanufatura e fornecimento de peças de reposição após a venda do produto – este sistema comporta diversas vantagens como aumento da satisfação do cliente, prolongamento da vida útil do produto e favorecimento da sustentabilidade empresarial.

A técnica de *Mapeamento de Fluxo de Valor Entendido*, apresentada por Kvadsheim et al. (2021), trata de mapear e analisar os fluxos de valor num processo. Para além de analisar e registar os fluxos do processo, permite ainda identificar oportunidades de melhoria, pontos onde se pode melhorar a eficiência e sustentabilidade ao longo do ciclo de vida do produto. A complementar esta técnica, os mesmos autores sugerem uma *framework* do *Valor não Capturado*, isto é, uma abordagem com foco na identificação do valor que não se encontra a ser aproveitado ou capturado.

A culminar o referido acima, Mangers et al. (2021) sugerem a adoção de uma técnica *Lean Manufacturing*, a *Value Stream Mapping* (VSM). Nos processos de economia circular, a VSM contribuiria para (1) Avaliação de cadeias de processos – mapeando as cadeias de ciclo de vida do produto –, (2) Visualização de fluxos – desenvolvendo diagramas com incidência no fluxo de produção do produto, evidenciando pontos de desperdício ou insuficiências – e (3) Melhoria Contínua – promovendo o aperfeiçoamento do fluxo de produção do produto, com vista a adoção de uma EC. A VSM tem como benefícios associados a transparência do circuito,

eficiência e colaboração, pois facilita a comunicação entre as partes interessadas ao alinhar objetivos e estratégias sustentáveis.

Economia

Pan (2019) apresenta o termo *Inteligência Financeira* caracterizando-o como o uso de tecnologias de SI e metodologias analíticas para entender o comportamento dos mercados financeiros e economia global, que implica o interrupto controlo aos mais diversos fatores. Este conceito ganha importância com a possibilidade de redução de risco e identificação de oportunidades, apoiando as tomadas de decisão estratégicas fundamentadas por informações precisas, relevantes e atualizadas.

Para além da tecnologia do *big data* – que segundo esta abordagem, por si só não é suficiente para garantir o bom funcionamento do processo de análise de dados, por estes mercados em estudo sofrerem alterações rápidas –, recorre-se também a IA e ML, na ótica de aperfeiçoamento da análise de dados, ao identificar sequências complexas e *insights* que não são detetados por tecnologias de *big data*. Ainda se recorre a uma análise qualitativa e dados alternativos, na medida de incorporação de dados qualitativos e fontes alternativas, como notícias, conteúdo publicado nas redes sociais e informações não estruturadas por forma a aumentar a dimensão e qualidade da base de dados, fornecendo uma visão mais completa da economia global.

O autor sugere a aplicação de tecnologias e metodologias avançadas como *Sistemas de Monitoramento Inteligente* (algoritmos e técnicas de IA que observam e analisam indicadores económicos em tempo real), *Observatórios Financeiros* (tecnologias que integram várias fontes de dados e recorrem a métodos analíticos de modo a disponibilizar uma visão abrangente e atualizada da economia global) e *Modelos Preditivos* (na medida de prever a evolução de fatores económicos, financeiros e sociais).

Modelos de Negócio

As parcerias entre IoT e tecnologias de *blockchain* oferecem ainda a possibilidade de um modelo de negócio baseado na partilha e *leasing*, onde a necessidade de posse ou aquisição dá lugar à possibilidade de acesso (algo também salientado por Sjödin et al., 2023, assim como Nikitaeva e Dolgova, 2023).

Salminem et al. (2017) no seu estudo relaciona a digitalização e *big data* na coevolução de empresas, sabendo que este processo se traduz na evolução adaptativa das práticas e

estratégias de uma empresa com vista ao encontro dos objetivos de, neste caso, desenvolvimento sustentável e as expectativas sociais. O primeiro tópico abordado pelos autores passa pela garantia de sustentabilidade através da monitorização e melhor do impacto ambiental, pela análise de dados com vista à redução de desperdício e consequente otimização de recursos em simultâneo com a implementação de práticas de produção mais sustentáveis, sabendo que esta digitalização permite ainda a conceção de relatórios de sustentabilidade mais transparentes e precisos. O segundo tópico abordado relaciona a responsabilidade social com as tecnologias digitais, onde se torna possível controlar as práticas dos fornecedores e origem das matérias-primas, enquanto se avalia o impacto social e eficácia das iniciativas corporativas no âmbito da responsabilidade social. Quanto ao terceiro e último tópico abordado, a inovação e competitividade são garantidas pela aplicação das tecnologias referidas no foco na inovação e na capacidade de adaptação às oscilações das condições do mercado (a nível da procura e expectativas dos clientes), pelo desenvolvimento de novos produtos ou serviços que satisfaçam as necessidades dos consumidores e estratégias à base de dados.

6.1.5. Desafios de aplicação

Desafios Sociais e Éticos

Alanya-Beltran et al. (2022), Hau et al. (2023), Mageto (2022), Kar et al. (2022) e Bag e Rahman (2024), nas suas investigações destacam alguns receios no âmbito de desafios sociais e éticos, no que concerne ao cuidado em relação a questões de privacidade e segurança dos dados corporativos, uma vez que estes podem sofrer fugas ou ser utilizados de forma indevida.

Estes fazem ainda referência a desafios enfrentados pelos *stakeholders*, com foco no conhecimento de conceitos e teorias, *frameworks* e regulamentações. Aqui é também exigido a erradicação de fatores associados ao desequilíbrio, tanto ao nível financeiro como cognitivo, uma vez que a aplicação e recurso a SI nos processos de gestão são restringidos pelas reduzidas ou falta de condições de infraestruturas, grau de conhecimento sobre a matéria, pouca capacidade de implementação dos sistemas e programas por parte dos recursos humanos e ainda políticas/regulamentos inexistentes ou erradamente formulados.

Desafios Económicos

Um tópico em comum na grande maioria da documentação aqui analisada passa pelos desafios a nível económico, onde é referido o peso do custo dos investimentos iniciais ou de implementação de sistemas, sejam estes relativamente a aquisição de equipamentos, *software* e/ou adaptação dos processos existentes. A capacitação dos recursos humanos está também englobada nestes desafios, pois implica gastos com formação essencial com vista a garantir a capacidade dos trabalhadores com contacto a estes equipamentos e *softwares* (Alanya-Beltran et al., 2022; Hau et al., 2023; Mageto, 2022; Dey et al., 2023; Ivanova e Shkrobot, 2023; Mangla et al., 2024). Existem ainda custos de atualização e manutenção dos sistemas, que deve ser contínua para assegurar o seu funcionamento ao nível desejado, não esquecendo que devido a elevado ritmo de evolução de tecnologias, as atuais e que suprimem as necessidades atuais se podem tornar obsoletas a qualquer momento, pelo que as empresas devem estar preparadas para atualizar regularmente os seus *hard* e *softwares*, mantendo o nível de sustentabilidade e competitividade. Ainda que esta atualização seja naturalmente exigida, não garante resultados imediatos, pelo que tem associada alguma incerteza no seu processo.

Desafios Tecnológicos

Complementando a visão descrita pelos autores anteriormente referidos, Anwar et al. (2024), Schoitsch (2023) e Niu et al. (2019), assim como Ismail (2023) e Rusch et al. (2023), abordam também questões no âmbito da proteção de dados. Estes preocupam-se com a aquisição, qualidade, fluxo e privacidade dos mesmos, defendendo ainda que estes devem ser constantemente atualizados, tarefa que se pode ver dificultada por alguma questão de conectividade ou falha no processamento de grande volume de dados, exigindo, assim, um sistema apoiado por recursos fortes para serem atingidas as exigências de gestão, processamento e análise de grande quantidade de dados a longo prazo. Tópicos como compatibilidade e colaboração são também abordados, fazendo alusão à IoT, onde é referida a necessária tecnologia de 5.^a geração (5G) para garantir a atualização e processamento de dados em tempo real permitindo atingir a máxima eficiência operacional.

Janicke et al. (2023) e Schoitsch (2021) apresentam soluções para esta preocupação relacionada com a proteção de dados. Os riscos de segurança podem ser mitigados por: (1) Recurso de criptografia na transmissão de dados entre dispositivos, (2) Implementação de tecnologias de autenticação e controlo de acesso e (3) Atualização de software, por forma a corrigir algum erro ou fragilidade conhecida.

6.1.6. Benefícios de aplicação

Impacto Ambiental

Como já referido num ponto anterior, no âmbito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apresentados e promovidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas, Solanki et al. (2023) apresenta na sua investigação o contributo específico que a IA e os SI podem ter no cumprimento dos mesmos. Apesar dos autores abordarem todos os aspetos em que estas tecnologias contribuem para o seu alcance, nesta investigação far-se-á apenas menção do benefício que se enquadra no tema em estudo. Visto isto, os autores reforçam a ideia de que a IA contribui para a adoção de uma EC e alcance dos ODS através do aumento de eficiência e precisão, capacidade de processar grande volume de dados e ainda pela inovação e adaptabilidade.

Modelos de Negócio

O leque de benefícios é alargado pela criação de novas ideias de negócio, baseadas numa produção “mais limpa”, que gera por consequência novos mercados e postos de trabalho – o que se traduz em aspetos positivos tanto para empreendedores como para trabalhadores e população em geral (Anwar et al., 2024; Mukherjee et al., 2024; Nikitaeva e Dolgova, 2023; Liu et al., 2023). Sjödin et al., 2023 complementa esta ideia, como outros autores referidos nesta investigação, pela criação de uma economia de partilha, que se rege por aplicações digitais e se baseia em modelos de *pay-per-use* (fixando tabelas de preços consoante utilizações, e não aquisição/compra) e de *leasing* ou aluguer.

No âmbito do *Sistema de Manufatura Reconfigurável* (Mejía-Moncayo et al., 2021; Winarno et al., 2023; Sjödin et al., 2023; Awan et al., 2021; Mukherjee et al., 2024; Hasan et al., 2023), surgem diversos benefícios já abordados por outros autores, como redução dos custos associados e utilização de outros recursos e diminuição dos resíduos provenientes deste processo produtivo pelo uso otimizado dos mesmos. Estes autores justificam o uso do seu sistema também por permitir à empresa uma rápida resposta às mudanças e acontecimentos no mercado, ao se basear num processo de melhoria contínua, onde há lugar para a flexibilidade do sistema que consequentemente facilita a introdução de novos processos e tecnologias de produção.

Pan (2019) com o foco da aplicação de tecnologias de SI no mercado financeiro global, apresenta benefícios desta aplicação, nomeadamente na melhoria da previsão de mudanças neste mercado o que permite antecipar ações e atitudes face a estas oscilações, identificação de riscos e oportunidades de investimento e tomadas de decisão informadas.

Logística Inversa

Dey et al. (2023) foca do seu estudo neste tópico de análise, onde define “*Logística Inversa*” como o processo de mover produtos do fim da cadeia de produção (consumo) até ao início com vista à reciclagem, reutilização ou destarte adequado, tornando possível a recuperação do valor de produtos usados.

Outras autoras com foco neste tipo de cadeia logística são Ivanova e Shkrobot (2023) que também caracterizam uma cadeia baseada na logística inversa como crucial para a sustentabilidade e adaptação do modelo de EC. Das tecnologias associadas aos Sistemas Inteligentes, o ML quando aplicado ao modelo de EC apresenta vantagens nos processos de logística inversa, na ótica de melhoria do sistema de produção e redução dos impactos ambientais, apoiado no processo de digitalização e algoritmos inteligentes, que contribui para a diminuição de incertezas, facilitando a tomada de decisão neste âmbito.

Recorrendo a um exemplo prático e real, o caso de recuperação de pilhas, que tem a sua importância devido à presença de materiais valiosos na sua composição e ao impacto ambiental positivo associado ao seu reaproveitamento, este processo recorre a diversas tecnologias de IA. Necessita do auxílio de *robots* especializados e de sistemas automatizados por forma a garantir a precisão de recolha evitando quaisquer danos no processo, o que contribuiativamente para a segurança dos trabalhadores (Meng et al., 2022; Liu et al., 2023).

Redução de custos

Baker et al. (2021) referem a amplificação dos benefícios do uso mais inteligente dos recursos, ao fechar ciclos de utilização de matéria-prima e o aumento do ciclo de vida dos produtos, algo complementado por Anwar et al. (2024, p. 7) e Munin et al., (2023), ao atribuírem a este modelo os conceitos de “*balanço e harmonia*” a longo prazo que deve ser interpretado como um benefício de âmbito económico ao diminuir custos nesta poupança de materiais, como referido no parágrafo seguinte.

Alanya-Beltran et al. (2022), à semelhança de Ismail (2023) e Elghaish et al. (2022) com o seu foco no recurso do modelo, apresentam como benefícios a eficiência operacional, a redução de custos e outros recursos (para além de monetários, recursos humanos e temporais), a diminuição do impacto ambiental ao minimizar as emissões de gases de efeito estufa, por exemplo, fruto da falta de necessidade de recolha de matérias-primas não antes utilizadas, pois, o que nos conduz ao benefício seguinte, o sistema rege-se essencialmente por um processo de reciclagem contínua.

Benefícios associados à interligação de DT e o *Simulação de Monte Carlo*, como sugerido por Züst et al. (2021) e Jaouhari e Arif (2024) passam também pelo aumento da precisão, eficiência dos processos e a redução de custos associada a esta aplicação, que contribuemativamente para a sustentabilidade, através da adoção de práticas sustentáveis pelo reaproveitamento e reciclagem das matérias-primas e resíduos.

Retomando a utilização de fórmulas matemáticas apresentada por Foussard et al. (2021), o modelo *Lot-Sizing* comporta benefícios como a otimização dos custos, uma vez que este determina a frequência e quantidades de manutenção necessárias para os determinados lotes analisados, e alarga o ciclo de vida dos equipamentos com papel de manutenção, já que sugere medidas de manutenção preventivas e corretivas.

No que concerne à organização e gestão de produtos no armazém das empresas (Awan et al., 2021; Jaouhari e Arif, 2024; Hau et al., 2023; Munin et al., 2023), este também retira benefícios das tecnologias abordadas ao longo da investigação. Estes podem ser otimizados segundo a previsão da procura futura pela análise contínua de dados de armazenamento, através de sistemas preditivos e sensores que registem tal informação. Esta gestão de *stocks* em armazém, contribui ainda para a satisfação do cliente, onde são garantidas as condições de *stock* correspondentes à procura num determinado momento, sem existir necessariamente desperdício de recursos.

Q3: Que condições são necessárias para maior adaptação dos Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular?

Condições Sociais e Éticas

Um dos requisitos a garantir passa pelas condições sociais, algo salientado por Anwar et al. (2024), Mukherjee et al. (2024) e Schoitsch (2023) ao comparar a abordagem que os países desenvolvidos e os países em desenvolvimento adotam. Os primeiros procuram ativamente reduzir a dependência de recursos fósseis, minerais e metais ao adotar este modelo circular, ao passo que os segundos têm esta tarefa dificultada pela falta de conhecimento e tecnologia, enquanto assistem ao aumento da procura de matérias-primas, energia e água derivado do aumento da população e exigências das indústrias nestas geografias.

Atualmente, entidades como a *Ellen MacArthur Foundation*, fundada em 2009 com o objetivo de promover a adoção da EC, ajuda organizações e indivíduos disponibilizando cursos avançados relacionados com o tema. A OCDE tem também um papel ativo na promoção da EC, apoiando diversas cidades e regiões através de um método de medição, aprendizagem e partilha – ao medir e desenvolver um modelo de tomada de decisão e definição de abordagem ao modelo circular, partilhando conhecimento no âmbito da perspetiva de ação face às oportunidades e desafios identificados e, no que concerne à partilha, dispõe de lições e trabalhos de investigação aos interessados envolvidos, fruto das pesquisas e práticas baseadas na sua experiência internacional.

Quanto a regulamentação e políticas, sugerem a criação de regras e benefícios que sensibilizem para a adoção de processos de EC, que atuem de forma negativa (como multas) ou positiva (através da criação de leis que sensibilizem e beneficiem a mudança de um sistema linear para um sistema circular) (Despeisse et al., 2021; Winarno et al., 2023; Solanki et al., 2023; Mukherjee et al., 2024; Hasan et al., 2023; Halliou et al., 2022; Schoitsch, 2021).

A percepção e hábitos de consumo da população têm também de ser considerados nas condições necessárias na adoção deste modelo circular. Despeisse et al. (2021) e Solanki et al. (2023) reforçam a ideia de que o consumidor final deve estar consciente dos impactos que o modelo da EL comporta e ter acesso a exemplos de soluções que se oponham a estes mesmos impactos negativos. Quanto à falta de informação do público acerca do impacto ambiental do produto, do seu processo de fabrico e origem de matéria-prima. Com isto, deve ser aumentado

o nível de transparência na passagem de informação por forma a, mais uma vez, sensibilizar e persuadir o consumidor final a optar por soluções mais sustentáveis.

Berbenni-Rehm (2023), Pan (2019) e Mercier-Laurent (2020) abordam o tema de distribuição de conhecimento, na medida em que promove uma EC de conhecimento, que se trata do processo de recolha, gestão e reciclagem de conhecimento, isto é, o conhecimento adquirido deve ser novamente partilhado. Com recurso a IA, é possível identificar possíveis foco de necessidade de conhecimento, promovendo ainda a igualdade de condições através de sistemas de partilha responsáveis e transparentes, incentivando o envolvimento de investigadores e decisores políticos.

Ao assistir à aplicação da IA nas mais diversas áreas, Dwivedi et al. (2023) desenvolveram um estudo com foco nas tendências futuras desta utilização. O estudo preocupa-se com o impacto que as adoções de tecnologias terão nos níveis e qualidade de emprego da população, assim como algum erro que possa derivar da análise de dados por parte da IA ou SI. Consideram essencial o desenvolvimento sustentável da IA, promovendo um avanço responsável e ético, com evidências de um estudo aprofundado focado na equidade e justiça na implementação destes sistemas.

Condições Económicas

Para além de aplicar as teorias e o que foi mencionado ao longo da investigação no âmbito do impacto e redução de custos, o recurso a serviços de *outsourcing* pode ainda contribuir para o mesmo fim. Este recurso comporta benefícios como a especialização dos elementos externos nas tarefas a desempenhar que auxiliam em determinado momento da cadeia. Aqui pode ser aplicado um *Modelo de Decisão Multicritério*, isto é, na seleção do parceiro externo, tem em consideração fatores como custo, impacto ambiental, viabilidade técnica, integração e alinhamento com as práticas do negócio e aceitação do mercado (Oliveira Silva e Morais, 2022).

Condições Tecnológicas

Podendo ser encarados como desafios, serão aqui abordados numa ótica de requisitos necessários para o avanço na adoção de Sistemas Inteligentes nos processos de Economia Circular. Mercier-Laurent (2020), Despeisse et al. (2021), Winarno et al. (2023), Solanki et al. (2023), Mukherjee et al. (2024), Hasan et al. (2023), Salminem et al. (2017), Liu et al. (2023)

e Bag e Rahman, (2024) referem condições de aplicação como a inovação e desenvolvimento de produtos, onde se deve ter em atenção o seu processo de desmontagem, no âmbito da logística inversa, e reciclagem de componentes, que deriva da sinergia de diversos setores, apelando à sua colaboração.

Face ao estudo é sugerido um quadro conceitual com foco na integração de tecnologias – IoT, BIM, *big data*, IA, robótica e *blockchain* – para suportar a adoção de economia circular. A par desta integração, é sugerida a criação de uma plataforma digital unificada que permita a comunicação e partilha de informação em tempo real entre as diferentes tecnologias e *stakeholders*. O recurso a esta plataforma surgiria na medida de desenvolvimento de regulamentação, ou seja, seriam estabelecidos protocolos comuns para garantir a interoperabilidade e integração de conhecimento, enquanto se investe na formação e capacitação dos utilizadores. Com esta plataforma ativa, seria fomentada a colaboração entre setores, empresas, instituições académicas e governamentais, com vista a promover a pesquisa e desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis (Elghaish et al., 2022; Awan et al., 2021; Mukherjee et al., 2024; Hau et al., 2023; Hasan et al., 2023; Mageto, 2022; Nikitaeva e Dolgova, 2023; Gibbin et al., 2023).

Quanto à participação de instituições governamentais, Bag e Pretorius (2024), referem um conjunto de tipos de pressão que pode surgir por forma a incentivar e garantir tal participação: *Pressão Normativa*, *Pressão Coerciva* e *Pressão Mimética*.

O primeiro tipo de pressão está relacionado com normas sociais, expectativas culturais e profissionais, como por exemplo as expectativas da população e *stakeholders* face à disponibilidade de produtos sustentáveis e surgimento de regulamentação normativa que promova a responsabilidade ambiental junto da indústria. Já a pressão coerciva provém de regulamentos, leis e políticas públicas, como legislação a obrigar as empresas a reduzir emissões de dióxido de carbono, a adoção de processos de reciclagem ou incentivos fiscais e subsídios para as empresas que adotam práticas sustentáveis. Relativamente à pressão mimética passa apenas pela replicação de práticas de organizações bem-sucedidas.

Capítulo 7. Conclusão

A Inteligência Artificial e respetivas tecnologias estão em constante evolução e atualização o que concede tal importância ao tema e investigações realizadas no seu âmbito. Os Sistemas Inteligentes impactam de forma positiva o aumento da sustentabilidade e redução de utilização de recursos, nomeadamente financeiros e humanos, o que deve ser encarado como um motivo de adoção para as empresas nos mais diversos setores, garantindo o cumprimento de princípios éticos e regulamentares.

Com este ritmo de evolução e atualização das tecnologias, torna-se imprescindível o constante estudo e recolha de informação. Visto isto, a investigação aqui desenvolvida, procura em primeiro lugar contribuir para a comunidade através da recolha de informação atualizada sobre os tópicos em estudo.

Através do método de análise bibliométrica, recorrendo à base de dados *Elsevier Scopus* e à ferramenta *VOSviewer*, foi possível selecionar a documentação que mais se enquadrava como o objetivo do estudo, a par da sua coerência e relevância.

Em termos dos resultados obtidos nestas ferramentas, foi possível verificar que a ligação destes dois temas teve o seu início de pico de interesse em 2021, atingindo o seu máximo em 2023, sendo esperado que este pico seja ultrapassado anualmente. Já relativamente à área de foco das investigações desenvolvidas, domina a Ciência Ambiental seguida pela área de Informática ou Ciências da Computação, enquanto Negócios, Gestão e Contabilidade surge na 4.^a posição do *ranking*, marcando presença em sensivelmente 10% das publicações disponíveis. A análise de palavras-chave e *clusters* formados por relações detetadas entre os termos, resultou na criação de 6 *clusters* ao reunir 54 palavras-chave, das quais se destacam *Economia Circular* e *Inteligência Artificial*.

Após análise de conteúdo da documentação disponível, foi possível comprovar a ligação entre Economia Circular e Sistemas Inteligentes, assim como as áreas de complementaridade entre os dois temas. Nesta investigação, abordaram-se ainda desafios de aplicação de tecnologias no modelo circular a diversos níveis, no entanto é um esforço justificado pelos benefícios de retorno associados. Uma das questões de pesquisa incidiu sobre as condições a garantir para assegurar o retorno deste investimento, essencialmente a nível financeiro, pelo que instituições académicas e governamentais, tal como outras entidades não-governamentais (como a *Ellen MacArthur Foundation*) podem auxiliar nesta transição de modelo, visto que os

benefícios e vantagens de adoção da Economia Circular não se restringem apenas às empresas que o aplicam nos seus processos.

A implementação de SI nos processos de economia circular das empresas comporta diversos obstáculos. Esta pode ser dificultada pelos custos altos iniciais e a necessidade de haver uma infraestrutura tecnológica forte, o que pode não se verificar em empresas de menor dimensão ou que se localizarem em países em desenvolvimento. Na ótica do utilizador, os recursos humanos alocados a tarefas com contacto a estas tecnologias podem também apresentar algumas limitações por falta de conhecimento ou inércia à mudança. Ainda, discussões sobre a proteção e segurança dos dados são recorrentes e representam um desafio significativo.

Por forma a ultrapassar estas limitações, estratégias com foco no enriquecimento a nível tecnológico dos recursos humanos devem ser incentivadas, procurando desenvolver o conhecimento dos conceitos relacionados com o tema, através de, por exemplo, programas de formação contínua dentro das empresas. Outro fator facilitador passa pela criação de normas e regulamentos públicos que promovam a adesão de SI e IA nos seus processos, na tentativa de diminuir os custos de implementação. Também se deve verificar um forte investimento em Inovação e Desenvolvimento com o intuito de aprimorar as tecnologias atuais, no âmbito da acessibilidade e segurança. Pesquisas futuras poderão incidir em soluções cooperativas entre empresas, universidades e instituições governamentais, como já sugerido por diversos autores, possibilitando o aparecimento de ecossistemas de inovação que englobem sistemas de economia circular e modelos de negócio baseados neste modelo.

Pode, assim, concluir-se que o estudo da relação entre Sistemas Inteligentes e o modelo de Economia Circular é, para além de pertinente e aliciante, útil para toda a sociedade em diversos níveis e campo de aplicação, devendo manter o seu ritmo de publicações e respetivo interesse no futuro. A junção dos dois temas representa uma oportunidade de estudo para os investigadores, uma vez que, fruto da rápida evolução do campo, terão sempre à disposição novo material de estudo e chance de desenvolvimento de novas teorias e modelos.

Capítulo 8. Referências bibliográficas

Abou Baker, N., Szabo-Müller, P., & Handmann, U. (2021). A Feature-Fusion Transfer Learning Method as a Basis to Support Automated Smartphone Recycling in a Circular Smart City. In S. Paiva, S. I. Lopes, R. Zitouni, N. Gupta, S. F. Lopes, & T. Yonezawa (Eds.), *Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Informatics Telecommun. Eng.* (Vol. 372, pp. 422–441). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76063-2_29

Alanya-Beltran, J., Hassan, A. M. M., Bag, A., Debnath, M., & Bora, A. (2022). Critical Analysis of Intelligent IoT in Creating Better Smart Waste Management and Recycling for Sustainable Development. In V. E. Balas, G. R. Sinha, B. Agarwal, T. K. Sharma, P. Dadheeck, & M. Mahrishi (Eds.), *Commun. Comput. Info. Sci.: Vol. 1591 CCIS* (pp. 217–225). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07012-9_19

Ali, Z. A., Zain, M., Hasan, R., al Salman, H., Alkhamees, B. F., & Almisned, F. A. (2024). Circular Economy Advances with Artificial Intelligence and Digital Twin: Multiple-Case Study of Chinese Industries in Agriculture. *Journal of the Knowledge Economy*. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02101-w>

Alonso, S. L. N., Forradellas, R. F. R., Morell, O. P., & Jorge-Vazquez, J. (2021). Digitalization, circular economy and environmental sustainability: The application of artificial intelligence in the efficient self-management of waste. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13042092>

Andono, P. N., Ocky Saputra, F., Shidik, G. F., & Arifin Hasibuan, Z. (2022). End-to-End Circular Economy in Onion Farming with the Application of Artificial Intelligence and Internet of Things. *Int. Semin. Appl. Technol. Inf. Commun.: Technol. 4.0 Smart Ecosyst.: A New Way Doing Digit. Bus., ISemantic*, 459–462. <https://doi.org/10.1109/iSemantic55962.2022.9920447>

Awan, U., Kanwal, N., Alawi, S., Huiskonen, J., & Dahanayake, A. (2021). Artificial Intelligence for Supply Chain Success in the Era of Data Analytics. In *Stud. Comput. Intell.* (Vol. 935, pp. 3–21). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85101969761&doi=10.1007%2f978-3-030-62796-6_1&partnerID=40&md5=a3a6c7d3bdced53ef650a6e33ff2ab28

Bag, S., & Pretorius, J. H. C. (2022). Relationships between industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: proposal of a research framework. *International Journal of Organizational Analysis*, 30(4), 864–898. <https://doi.org/10.1108/IJOA-04-2020-2120>

Bag, S., Pretorius, J. H. C., Gupta, S., & Dwivedi, Y. K. (2021). Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities. *Technological Forecasting and Social Change*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120420>

Bag, S., & Rahman, M. S. (2024). Navigating circular economy: Unleashing the potential of political and supply chain analytics skills among top supply chain executives for environmental orientation, regenerative supply chain practices, and supply chain viability. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 504–528. <https://doi.org/10.1002/bse.3507>

Berbenni-Rehm, C. (2023). Evidence-based AI, ethics and the circular economy of knowledge. *AI and Society*, 38(2), 889–895. <https://doi.org/10.1007/s00146-022-01581-1>

Chaouni Benabdellah, A., Zekhnini, K., & Cherrafi, A. (2021). Sustainable and Resilience Improvement Through the Design for Circular Digital Supply Chain. In A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, von C. G, & D. Romero (Eds.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 633 IFIP* (pp. 550–559). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_58

Despeisse, M., Chari, A., González Chávez, C. A., Chen, X., Johansson, B., Igelmo Garcia, V., Syberfeldt, A., Abdulfatah, T., & Polukeev, A. (2021). Achieving Circular and Efficient Production Systems: Emerging Challenges from Industrial Cases. In A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, von C. G, & D. Romero (Eds.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 633 IFIP* (pp. 523–533). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_55

Dey, P. K., Chowdhury, S., Abadie, A., Vann Yaroson, E., & Sarkar, S. (2023). Artificial intelligence-driven supply chain resilience in Vietnamese manufacturing small- and medium-sized enterprises. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2179859>

Dwivedi, A., Agrawal, D., Jha, A., & Mathiyazhagan, K. (2023). Studying the interactions among Industry 5.0 and circular supply chain: Towards attaining sustainable development. *Computers and Industrial Engineering*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108927>

Dwivedi, Y. K., Sharma, A., Rana, N. P., Giannakis, M., Goel, P., & Dutot, V. (2023). Evolution of artificial intelligence research in Technological Forecasting and Social Change: Research topics, trends, and future directions. *Technological Forecasting and Social Change*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122579>

Elghaish, F., Matarneh, S. T., Edwards, D. J., Pour Rahimian, F., El-Gohary, H., & Ejohwomu, O. (2022). Applications of Industry 4.0 digital technologies towards a construction circular economy: gap analysis and conceptual framework. *Construction Innovation*, 22(3), 647–670. <https://doi.org/10.1108/CI-03-2022-0062>

Foussard, E., Espinouse, M.-L., Mounié, G., & Nattaf, M. (2021). A Lot-Sizing Model for Maintenance Planning in a Circular Economy Context. In A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, von C. G, & D. Romero (Eds.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 631 IFIP* (pp. 673–682). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85902-2_72

Gebhardt, M., Kopyto, M., Birkel, H., & Hartmann, E. (2022). Industry 4.0 technologies as enablers of collaboration in circular supply chains: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 60(23), 6967–6995. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1999521>

Gibbin, R. v., Sigahi, T. F. A. C., Pinto, J. D. S., Rampasso, I. S., & Anholon, R. (2023). Thematic evolution and trends linking sustainability and project management: Scientific mapping using SciMAT. *Journal of Cleaner Production*, 414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137753>

Gróf, C., & Netland, T. H. (2021). Setting the Stage for Research on Aftermarket Production Systems in Operations Management. In A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, von C. G, & D. Romero (Eds.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 631 IFIP* (pp. 212–219). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85902-2_23

Hallioui, A., Herrou, B., Santos, R. S., Katina, P. F., & Egbue, O. (2022). Systems-based approach to contemporary business management: An enabler of business sustainability in a context of industry 4.0, circular economy, competitiveness and diverse stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, 373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133819>

Hasan, M. M., Plamthottathil, R. K., Morshed, J., Sarkar, D., Hameed, N., & Cirstea, S. (2023). Circology: An AI-Enabled Blockchain-Based e-Waste Management Framework Using Non-Fungible Tokens (NFT) to Achieve Net Zero and Imply the Circular Economy. *IEEE Int. Conf. Blockchain Cryptocurrency, ICBC*. <https://doi.org/10.1109/ICBC56567.2023.10174985>

Hau, B. M., You, S.-S., Cho, G.-S., Yeon, J.-H., & Kim, H.-S. (2023). CIRCULAR SUPPLY CHAIN MANAGEMENT WITH BLOCKCHAIN INTEGRATION. *Logforum*, 19(4), 515–533. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2023.930>

Ismail, Z.-A. B. (2023). A critical study of the existing issues in circular economy practices during movement control order: can BIM fill the gap? *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30(8), 3224–3241. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2021-0676>

Ivanova, T., & Shkrobot, M. (2023). DIGITALIZATION IN THE REVERSE SUPPLY CHAIN: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS. *Logforum*, 19(4), 683–702. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2023.865>

Janicke, H., Abuadbba, S., & Nepal, S. (2020). Security and Privacy for a Sustainable Internet of Things. *Proc. - IEEE Int. Conf. Trust, Priv. Secur. Intell. Syst. Appl., TPS-ISA*, 12–19. <https://doi.org/10.1109/TPS-ISA50397.2020.00013>

Jaouhari, A., & Arif, J. (2024). Artificial intelligence of things and circular warehouse process management of automotive parts: conceptual framework and practice review. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 17(1), 109–135. <https://doi.org/10.1504/IJPMB.2024.137789>

Kar, A. K., Choudhary, S. K., & Singh, V. K. (2022). How can artificial intelligence impact sustainability: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134120>

Kopeinig, J., Woschank, M., & Olipp, N. (2024). Industry 4.0 Technologies and their Implications for Environmental Sustainability in the Manufacturing Industry. In F. Longo, W. Shen, & A. Padovano (Eds.), *Procedia Comput. Sci.* (Vol. 232, pp. 2777–2789). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.095>

Kvadsheim, N. P., Nujen, B. B., Powell, D., & Reke, E. (2021). Realizing Value Opportunities for a Circular Economy: Integrating Extended Value Stream Mapping and Value Uncaptured Framework. In A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, von C. G, & D. Romero (Eds.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 630 IFIP* (pp. 739–747). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85874-2_81

Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Computers and Industrial Engineering*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>

Mageto, J. (2022). Current and Future Trends of Information Technology and Sustainability in Logistics Outsourcing. *Sustainability (Switzerland)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137641>

Mangers, J., Minoufekr, M., & Plapper, P. (2021). Value Stream Mapping (VSM) to Evaluate and Visualize Interrelated Process-Chains Regarding Circular Economy. In A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, von C. G, & D. Romero (Eds.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 633 IFIP* (pp. 534–542). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_56

Mangla, S. K., Luthra, S., Garza-Reyes, J. A., Jabbour, C. J. C., & Brem, A. (2024). Sustainability and Industry 4.0: The role of social, environmental and technological factors in the development of digital manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change, 201*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123223>

Mejía-Moncayo, C., Kenné, J.-P., & Hof, L. A. (2021). A Hybrid Architecture for a Reconfigurable Cellular Remanufacturing System. In A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, von C. G, & D. Romero (Eds.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 631 IFIP* (pp. 488–496). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85902-2_52

Meng, K., Xu, G., Peng, X., Youcef-Toumi, K., & Li, J. (2022). Intelligent disassembly of electric-vehicle batteries: a forward-looking overview. *Resources, Conservation and Recycling, 182*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106207>

Mercier-Laurent, E. (2020). Platform for knowledge society and innovation ecosystems. In E. Mercier-Laurent (Ed.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 588 IFIP* (pp. 34–47). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52903-1_4

Mukherjee, S., Nagariya, R., Mathiyazhagan, K., Baral, M. M., Pavithra, M. R., & Appolloni, A. (2024). Artificial intelligence-based reverse logistics for improving circular economy performance: a developing country perspective. *International Journal of Logistics Management*. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2023-0102>

Munim, Z. H., Vladi, O., & Ibne Hossain, N. U. (2023). Data Analytics Applications in Supply Chain Resilience and Sustainability Management: The State of the Art and a Way Forward. In *Green. Ind. Network. Stud.* (Vol. 11, pp. 1–13). Springer. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85163627233&doi=10.1007%2f978-3-031-29823-3_1&partnerID=40&md5=e53259664dd6267eed12ab040d4c2375

Nikitaeva, A., & Dolgova, O. (2023). Digital Technologies and Circular Value Chains for Sustainable Development. In V. Kumar, G. L. Kyriakopoulos, V. Akberdina, & E. Kuzmin (Eds.), *Lect. Notes Inf. Sys. Organ.: Vol. 61 LNISO* (pp. 169–179). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30351-7_14

Niu, S., Zhuo, H., & Xue, K. (2019). DfRem-Driven closed-loop supply chain decision-making: A systematic framework for modeling research. *Sustainability (Switzerland), 11*(12). <https://doi.org/10.3390/SU11123299>

Noman, A. A., Akter, U. H., Pranto, T. H., & Haque, A. K. M. B. (2022). Machine Learning and Artificial Intelligence in Circular Economy: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review. *Annals of Emerging Technologies in Computing, 6*(2), 13–40. <https://doi.org/10.33166/AETiC.2022.02.002>

Pan, H. (2019). Intelligent finance global monitoring and observatory : A new perspective for global macro beyond big data. *Proc. - IEEE Int. Conf. Ind. Cyber Phys. Syst., ICPS*, 623–628. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2019.8780156>

Paraschos, P. D., Koulinas, G. K., & Koulouriotis, D. E. (2024). Reinforcement Learning-Based Optimization for Sustainable and Lean Production within the Context of Industry 4.0. *Algorithms, 17*(3). <https://doi.org/10.3390/a17030098>

Rejeb, A., Rejeb, K., Abdollahi, A., Zailani, S., Iranmanesh, M., & Ghobakhloo, M. (2022). Digitalization in food supply chains: A bibliometric review and key-route main path analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/su14010083>

Rosário, A. T., & Dias, J. C. (2022). Sustainability and the Digital Transition: A Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14074072>

Rusch, M., Schöggel, J.-P., & Baumgartner, R. J. (2023). Application of digital technologies for sustainable product management in a circular economy: A review. *Business Strategy and the Environment*, 32(3), 1159–1174. <https://doi.org/10.1002/bse.3099>

Sabale, D. B., Kaswan, M. S., Rathi, R., & Yadav, V. (2023). Investigating and modeling the circular economy enablers in product development process: net zero as a moderator. *Benchmarking*. <https://doi.org/10.1108/BIJ-06-2023-0401>

Salminen, V., Ruohomaa, H., & Kantola, J. (2017). Digitalization and big data supporting responsible business co-evolution. In T. Andre, J. I. Kantola, S. Nazir, & T. Barath (Eds.), *Adv. Intell. Sys. Comput.* (Vol. 498, pp. 1055–1067). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42070-7_96

Schoitsch, E. (2021). Trustworthy smart autonomous systems-of-systems - Resilient technology, economy and society. In P. Doucek, G. Chroust, & V. Oskrdal (Eds.), *IDIMT - Pandemics: Impacts, Strateg. Responses, Interdiscip. Inf. Manag. Talks* (pp. 377–388). Johannes Kepler Universität Linz. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112680361&partnerID=40&md5=df711eff817d15ae64c9d02706be55cf>

Schoitsch, E. (2023). AUTONOMOUS SYSTEMS AND SMART ENVIRONMENTS FOR A SUSTAINABLE LIFE. In P. Doucek, M. Sonntag, & L. Nedomova (Eds.), *IDIMT: New Challenges ICT Manag. - Interdiscip. Inf. Manag. Talks* (pp. 133–141). Trauner Verlag Universitat. <https://doi.org/10.35011/IDIMT-2023-133>

Seyyedi, S. R., Kowsari, E., Gheibi, M., Chinnappan, A., & Ramakrishna, S. (2024). comprehensive review integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model. *Journal of Cleaner Production*, 460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142584>

Silva, W. D. O., & Morais, D. C. (2021). A Group Decision Support System to Share Responsibilities Towards a Circular Economy Transition for Solid Waste Management in Developing Countries. *Conf. Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, 2221–2226. <https://doi.org/10.1109/SMC52423.2021.9658685>

Silva, O. W. D., & Morais, D. C. (2022). Impacts and insights of circular business models' outsourcing decisions on textile and fashion waste management: A multi-criteria decision model for sorting circular strategies. *Journal of Cleaner Production*, 370. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133551>

Sjödin, D., Parida, V., & Kohtamäki, M. (2023). Artificial intelligence enabling circular business model innovation in digital servitization: Conceptualizing dynamic capabilities, AI capacities, business models and effects. *Technological Forecasting and Social Change*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122903>

Solanki, N., Chaudhary, A., & Bhatia, D. (2023). Applications of Artificial Intelligence in the Attainment of Sustainable Development Goals. In *Signals Commun. Technol.* (pp. 49–62). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85150481945&doi=10.1007%2f978-3-031-19752-9_4&partnerID=40&md5=aae2c7592760bb644836d2a353a9a73d

Takhar, S. S., & Liyanage, K. (2020). The impact of Industry 4.0 on sustainability and the circular economy reporting requirements. *Int. J. Integr. Supply Manage.*, 13, 107–139. <https://doi.org/10.1504/IJISM.2020.107845>

Tutore, I., Parmentola, A., di Fiore, M. C., & Calza, F. (2024). A conceptual model of artificial intelligence effects on circular economy actions. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. <https://doi.org/10.1002/csr.2827>

Winarno, A., Nurhayati, O. D., Gernowo, R., & Hasibuan, Z. A. (2023). Alignment of Chan's Supply Value chain Waste Management Using Artificial Intelligence. *Int. Semin. Appl. Technol. Inf. Commun.: Smart Technol. Based Ind. 4.0: A New Way Recovery Glob. Pandemic Glob. Econ. Crisis, iSemantic*, 514–518. <https://doi.org/10.1109/iSemantic59612.2023.10295316>

Züst, S., Züst, R., Züst, V., West, S., Stoll, O., & Minonne, C. (2021). A graph based Monte Carlo simulation supporting a digital twin for the curatorial management of excavation and demolition material flows. *Journal of Cleaner Production*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127453>

Anexo A. Síntese de artigos

Ano	Autor(es)	Título	Palavras-Chave
2021	Abou Baker N.; Szabo-Müller P.; Handmann U.	A Feature-Fusion Transfer Learning Method as a Basis to Support Automated Smartphone Recycling in a Circular Smart City	Automation Systems; Circular City; Circular Economy; E-Waste Management; Feature Fusion; Smart City; Smartphone Recycling; Sustainability; Transfer Learning
2022	Alanya-Beltran J.; Hassan A.M.M.; Bag A.; Debnath M.; Bora A.	Critical Analysis of Intelligent IoT in Creating Better Smart Waste Management and Recycling for Sustainable Development	Circular Economy; Internet Of Things; Sustainable Development; Waste Management
2021	Alonso S.L.N.; Forradellas R.F.R.; Morell O.P.; Jorge-Vazquez J.	Digitalization, circular economy and environmental sustainability: The application of artificial intelligence in the efficient self-management of waste	Convolutional Networks; Data Augmentation; Deep Learning; Keras; Recycling; Sustainable Self-Recycling; Transfer Learning
2022	Andono P.N.; Ocky Saputra F.; Shidik G.F.; Arifin Hasibuan Z.	End-to-End Circular Economy in Onion Farming with the Application of Artificial Intelligence and Internet of Things	Artificial-Intelligent; Circular-Economy; Green-Economy; Internet-Of-Things
2021	Awan U.; Kanwal N.; Alawi S.; Huisken J.; Dahanayake A.	Artificial Intelligence for Supply Chain Success in the Era of Data Analytics	Artificial Intelligence; Data Analytics; Database Management Capabilities; Machine Learning
2024	Bag S.; Rahman M.S.	Navigating circular economy: Unleashing the potential of political and supply chain analytics skills among top supply chain executives for environmental orientation, regenerative supply chain practices, and supply chain viability	Artificial Intelligence-Driven Big Data Analytics Culture; Business Strategy; Circular Economy; Mixed Methods; Political Skills; Regenerative Supply Chain; Supply Chain Analytics
2024	Dey P.K.; Chowdhury S.; Abadie A.; Vann Yaroson E.; Sarkar S.	Artificial intelligence-driven supply chain resilience in Vietnamese manufacturing small- and medium-sized enterprises	Agility; Artificial Intelligence; Circular Economy; Organisational Factors; Risk Management; Supply Chain Resilience
2022	Elghaish F.; Matarneh S.T.; Edwards D.J.; Pour Rahimian F.; El-Gohary H.; Ejohwomu O.	Applications of Industry 4.0 digital technologies towards a construction circular economy: gap analysis and conceptual framework	Artificial Intelligence (AI); Blockchain; Construction Circular Economy; Emerging Digital Technologies; Industry 4.0; Internet Of Things (Iot)
2019	Fan B.; Cai Y.	The research of forecasting model of automobile parts recycling cost based on data intelligence	ARMA Model; Data Intelligence; Forecasting Model; Reverse Supply Chain

2021	Foussard E.; Espinouse M.-L.; Mounié G.; Nattaf M.	A Lot-Sizing Model for Maintenance Planning in a Circular Economy Context	Circular Economy; Lot-Sizing; Maintenance Planning; Mixed-Integer Linear Programming
2022	Han Y.; Shevchenko T.; Qu D.; Li G.	Smart E-waste Management in China: A Review	Circular Economy; E-Waste; Internet Based; Iot; Machine Learning; Smart E-Waste Collection
2023	Hau B.M.; You S.-S.; Cho G.-S.; Yeon J.-H.; Kim H.-S.	CIRCULAR SUPPLY CHAIN MANAGEMENT WITH BLOCKCHAIN INTEGRATION	Blockchain Technology; Circular Economy; Inventory Management; Particle Swarm Optimization; Supply Chain Management
2023	Ismail Z.-A.B.	A critical study of the existing issues in circular economy practices during movement control order: can BIM fill the gap?	BIM; Circular Economy; Construction Projects; Natural Resources; Optimisation; PC Building; Solid Wastes
2023	Ivanova T.; Shkrobot M.	DIGITALIZATION IN THE REVERSE SUPPLY CHAIN: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS	Blockchain; Circular Economy; Digital Transformation; Digitalization; Internet Of Things; Reverse Supply Chain
2024	Kopeinig J.; Woschank M.; Olipp N.	Industry 4.0 Technologies and their Implications for Environmental Sustainability in the Manufacturing Industry	Circular Economy; Digitalization; Green Logistics; Industrial Logistics; Industry 4.0; Industry 5.0; Sustainability
2021	Mejía-Moncayo C.; Kenné J.-P.; Hof L.A.	A Hybrid Architecture for a Reconfigurable Cellular Remanufacturing System	Cellular Manufacturing; Reconfigurability; Remanufacturing
2024	Mukherjee S.; Nagariya R.; Mathiyazhagan K.; Baral M.M.; Pavithra M.R.; Appolloni A.	Artificial intelligence-based reverse logistics for improving circular economy performance: a developing country perspective	AI-Based Circular Economy; Artificial Intelligence; Circular Economy Performance; Reverse Logistics
2023	Munim Z.H.; Vladi O.; Ibne Hossain N.U.	Data Analytics Applications in Supply Chain Resilience and Sustainability Management: The State of the Art and a Way Forward	Artificial Intelligence; Data Analytics; Supply Chain Management; Supply Chain Resilience; Sustainable Supply Chain
2023	Nikitaeva A.; Dolgova O.	Digital Technologies and Circular Value Chains for Sustainable Development	Circular Economy; Digital Technologies; Digitalization; Industrial Value Chains; Sustainable Development
2019	Niu S.; Zhuo H.; Xue K.	DfRem-Driven closed-loop supply chain decision-making: A systematic framework for modeling research	Closed-Loop Supply Chain (CLSC); Design For Remanufacture (Dfrem); Investment Cooperation; Modeling Framework; Operational Decision Optimization

2022	Noman A.A.; Akter U.H.; Pranto T.H.; Haque A.K.M.B.	Machine Learning and Artificial Intelligence in Circular Economy: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review	Artificial Intelligence; Bibliometric Analysis; Circular Economy; Machine Learning; Systematic Literature Review
2019	Pan H.	Intelligent finance global monitoring and observatory : A new perspective for global macro beyond big data	Global Economic Situation Monitoring; Global Environmental Risk Monitoring; Global Macro Hedge Funds; Global Monitoring; Global Risk Management; Global Trading; Intelligent Finance; Remote Sensing Finance
2017	Salminen V.; Ruohomaa H.; Kantola J.	Digitalization and big data supporting responsible business co-evolution	Circular Economy; Co-Evolution; Co-Innovation; Digitalization; Responsible Business Management; Transdisciplinary
2023	Sanchez-Sepulveda M.V.; Escudero D.F.; Navarro J.; Amo-Filva D.	Towards Accessible, Sustainable and Healthy Mobility: The City of Barcelona as Case Study	Big Data; Sustainable Mobility; Urban Design
2024	Schleier J.; Walther G.	Strategic network design for recycling of EPS insulation material--insights from a German case study	Chemical Recycling; Circular Economy; ETICS; Expanded Polystyrene; Reverse Logistics; Strategic Network Design
2021	Schoitsch E.	Trustworthy smart autonomous systems-of-systems - Resilient technology, economy and society	Artificial Intelligence; Autonomous Systems; Digitalization; Green Deal; Machine Ethics; Smart Production; Smart Systems; Society 5.0; Standardization; Systems-Of-Systems; Trustworthiness; UN Sustainable Development Goals
2023	Schoitsch E.	AUTONOMOUS SYSTEMS AND SMART ENVIRONMENTS FOR A SUSTAINABLE LIFE	Artificial Intelligence; Autonomous Vehicles; Circular Economy; Green Deal; Machine Ethics; Resilient Society; Smart Environments; Society 5.0; Standardization; Trustworthiness; Un Sustainable Development Goals
2021	Silva W.D.O.; Morais D.C.	A Group Decision Support System to Share Responsibilities Towards a Circular Economy Transition for Solid Waste Management in Developing Countries	Fittradeoff; Group Decision Support System; Shapley Value; Shared Responsibility; Solid Waste Management
2023	Sjödin D.; Parida V.; Kohtamäki M.	Artificial intelligence enabling circular business model innovation in digital servitization: Conceptualizing dynamic	Artificial Intelligence; Circular Business Models; Circular Economy; Digital Servitization; Digital Transformation;

		capabilities, AI capacities, business models and effects	Ecosystem; Platform; Sustainability; Twin Transition
2023	Solanki N.; Chaudhary A.; Bhatia D.	Applications of Artificial Intelligence in the Attainment of Sustainable Development Goals	Artificial Intelligence; Circular Economy; Health Sector; Machine Learning; Smart City; Sustainable Development Goals
2024	Tutore I.; Parmentola A.; di Fiore M.C.; Calza F.	A conceptual model of artificial intelligence effects on circular economy actions	Artificial Intelligence; Circular Economy; Literature Review; Resolve Framework
2023	Winarno A.; Nurhayati O.D.; Gernowo R.; Hasibuan Z.A.	Alignment of Chan's Supply Value chain Waste Management Using Artificial Intelligence	Artificial Intelligence; Recycle; Reduce; Reuse
2021	Züst S.; Züst R.; Züst V.; West S.; Stoll O.; Minonne C.	A graph based Monte Carlo simulation supporting a digital twin for the curatorial management of excavation and demolition material flows	Circular Economy; Construction Material Recycling; Digital Twin; Monte Carlo Method; Optimization

Quadro 2 – Síntese de artigos

Fonte: Adaptado de Elsevier Scopus, 2024