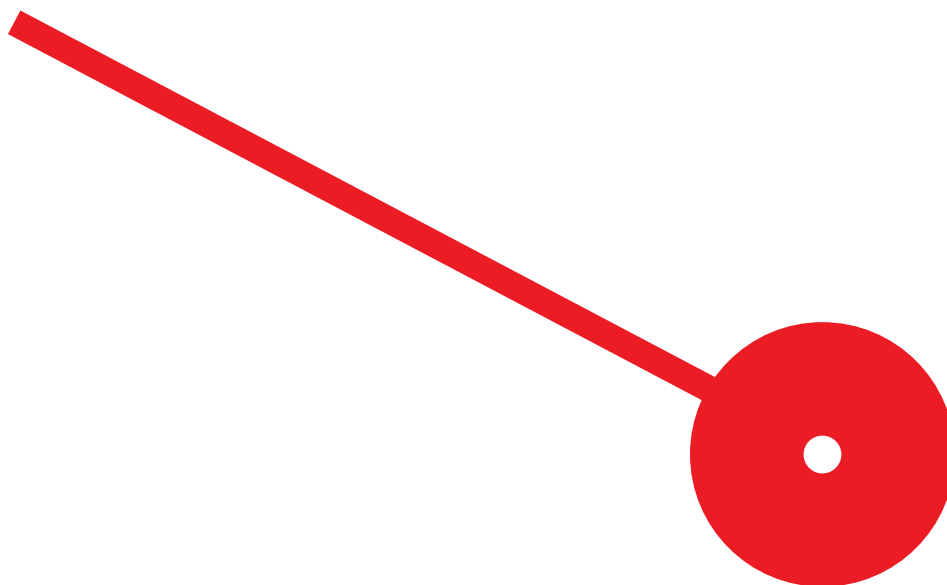




# O papel da Inteligência Artificial no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular

Gonçalo Daniel Oliveira Cruz

06/2025



Gonçalo Daniel Oliveira Cruz. O papel da Inteligência Artificial no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular  
06/2025





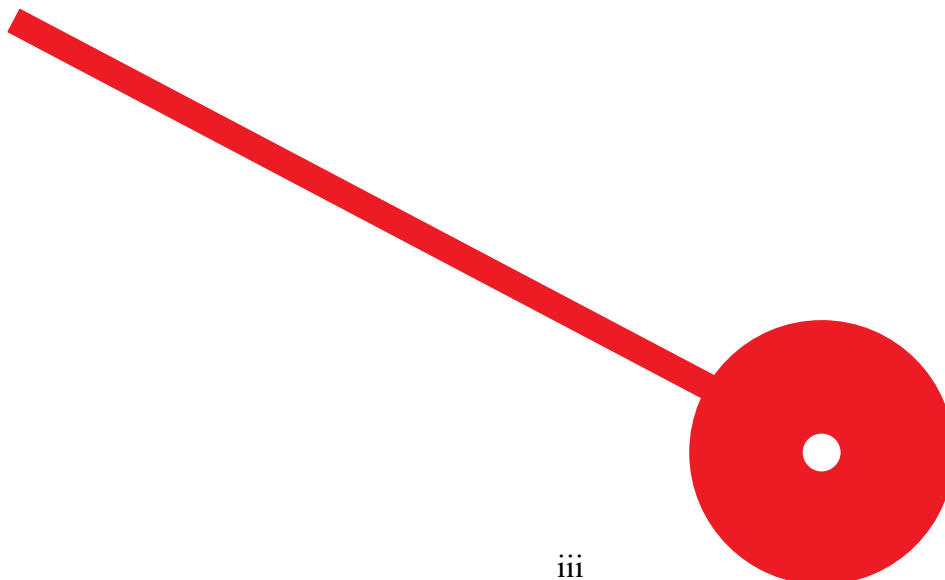
# O papel da Inteligência Artificial no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular

Gonçalo Daniel Oliveira Cruz

Dissertação de Mestrado

apresentado ao Instituto Superior de Contabilidade e  
Administração do Porto para a obtenção do grau de Mestre  
em Informação Empresarial, sob orientação da Professora  
Doutora Ana Isabel Rojão Lourenço Azevedo

Gonçalo Daniel Oliveira Cruz. O papel da Inteligência Artificial no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular  
06/2025





## **Resumo:**

A crescente urgência em adotar medidas mais sustentáveis por parte das empresas tem impulsionado a transição para a economia circular. Neste contexto, a Inteligência Artificial (IA) tem vindo a destacar-se como uma nova ferramenta essencial de apoio nesta transição ao oferecer soluções tecnológicas capazes de otimizar processos, apoiar decisões baseando-se em dados e reduzir desperdícios. Esta dissertação tem como objetivo analisar o papel da IA na promoção de práticas circulares em contexto empresarial, identificando os principais usos, tecnologias associadas e desafios enfrentados.

Para tal, foram realizadas entrevistas semiestruturadas a representantes de empresas que atuam em Portugal com relevância na área da sustentabilidade, complementadas pela respetiva análise temática. Este processo permitiu identificar os usos mais recorrentes dentro deste contexto, como a análise de dados, a triagem automática de resíduos, entre outros, as tecnologias mais utilizadas, como por exemplo computer vision e sensores inteligentes e os principais desafios associados à implementação e utilização de IA neste contexto.

A investigação contribui para o aprofundamento do conhecimento desta interseção entre tecnologia e sustentabilidade, oferecendo uma nova contribuição para este tema atual e cada vez mais relevante.

**Palavras chave:** Inteligência Artificial, Economia Circular, Modelos de Negócio, Sustentabilidade.

**Abstract:**

The growing urgency for companies to adopt more sustainable measures has driven the transition to a circular economy. In this context, Artificial Intelligence (AI) has emerged as an essential new tool to support this transition by offering technological solutions capable of optimizing processes, supporting decisions based on data and reducing waste. This dissertation aims to analyze the role of AI in promoting circular practices in a business context, identifying the main uses, associated technologies and challenges faced.

To this end, semi-structured interviews were conducted with representatives of companies operating in Portugal with relevance in sustainability, complemented by the respective thematic analysis. This process made it possible to identify the most recurrent uses within this context, such as data analysis, automatic waste sorting, among others, the most widely used technologies, such as computer vision and intelligent sensors, and the main challenges associated with implementing and using AI in this context.

The research contributes to deepening knowledge of this intersection between technology and sustainability, offering a new contribution to this current and increasingly relevant topic.

**Key words:** Artificial Intelligence, Circular Economy, Business Models, Sustainability.

## Índice geral

<b>Capítulo I - Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo II – Revisão De Literatura .....</b>	<b>5</b>
2.1 Economia Circular .....	6
2.2 Inteligência Artificial.....	7
2.3 Relação entre Economia Circular e Inteligência Artificial.....	9
2.4 Revisão Sistemática da Literatura .....	11
2.4.1 Identificação de literatura para inclusão .....	11
2.4.2 Limpeza de dados .....	13
2.4.3 Análise e síntese .....	14
2.4.4 Apresentação dos resultados.....	14
2.5 Principais usos de Inteligência Artificial identificados .....	17
2.5.1 Design de Produtos.....	17
2.5.2 Análise de dados .....	18
2.5.3 Sistemas de Triagem.....	19
2.5.4 Chatbots.....	20
2.5.5 Modelos de negócio circulares .....	20
2.6 Principais tecnologias de Inteligência Artificial identificadas .....	21
2.6.1 Machine Learning (ML) .....	22
2.6.2 Deep Learning (DL) .....	23
2.6.3 Computer Vision .....	23
2.6.4 Natural Language Processing (NLP).....	24
2.6.5 Sensores Inteligentes .....	25
2.6.6 Inteligência Artificial Generativa (GenAI).....	26
2.7 Principais desafios identificados .....	27
2.7.1 Segurança dos dados.....	27
2.7.2 Qualidade dos dados .....	28

2.7.3	Ética .....	29
2.7.4	Custos .....	29
2.7.5	Falta de competências.....	31
<b>Capítulo III – Abordagem metodológica.....</b>		<b>32</b>
3.1	Contexto de investigação .....	33
3.2	Metodologia de investigação .....	34
3.3	Entrevista Semiestruturada.....	35
3.3.1	Técnica de amostragem .....	35
3.3.2	Elaboração do guião .....	37
3.4	Análise Temática .....	40
3.5	Caracterização da amostra .....	43
<b>Capítulo IV – Apresentação de Resultados.....</b>		<b>46</b>
4.1	Usos de IA no apoio à economia circular.....	47
4.2	Tecnologias de IA aplicadas nas empresas.....	51
4.3	Desafios na implementação de IA nas empresas.....	54
4.4	Impactos nas empresas .....	57
<b>Capítulo V – Discussão dos resultados .....</b>		<b>61</b>
5.1	Principais usos e tecnologias de IA: convergências e limites em Portugal	62
5.2	Desafios associados ao uso de IA.....	63
5.3	Análise dos casos práticos e conclusões.....	65
<b>Capítulo VI – Conclusão .....</b>		<b>68</b>
6.1	Desafios e limitações .....	70
6.2	Trabalhos futuros.....	71
<b>Referências bibliográficas.....</b>		<b>72</b>
<b>Apêndices.....</b>		<b>80</b>
Apêndice I – Lista de documentos analisados durante a revisão sistemática de literatura		
.....		81

Apêndice II – Email de Pedido de Participação para a Entrevista..... 86

## Índice de Figuras

<b>Figura 1-</b> Conceito de Economia Circular.....	7
<b>Figura 2-</b> Comparação entre Economia Linear e Economia Circular .....	10
<b>Figura 3-</b> Processo de seleção e inclusão de artigos para o estudo .....	13
<b>Figura 4-</b> Robô “RecycleEye” de triagem da Valorsul .....	52

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1-</b> Principais usos de IA identificados e a sua frequência.....	14
<b>Tabela 2-</b> Principais tecnologias de IA identificadas e a sua frequência.....	15
<b>Tabela 3-</b> Principais desafios identificados e a sua frequência.....	16
<b>Tabela 4-</b> Relação entre os objetivos de investigação e o guião da entrevista .....	39
<b>Tabela 5-</b> Temas de análise e códigos associados .....	43
<b>Tabela 6-</b> Usos de IA identificados durante as entrevistas .....	51
<b>Tabela 7-</b> Tecnologias de IA identificadas durante as entrevistas.....	54
<b>Tabela 8-</b> Desafios identificados durante as entrevistas .....	57
<b>Tabela 9-</b> Impactos identificados durante as entrevistas .....	60
<b>Tabela 10-</b> Documentos da revisão de literatura analisados.....	85

## **Lista de abreviaturas**

IA – Inteligência Artificial

ML – Machine Learning

DL – Deep Learning

NLP – Natural Language Processing

GenAI – Generative Artificial Intelligence

IoT – Internet of Things

KPI – Key Performance Indicator

PMEs – Pequenas e Médias Empresas

LLM – Large Language Model

## **CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO**

---

Sustentabilidade tem sido um dos temas mais comentados nos últimos anos, os crescentes níveis de poluição e a consequente procura de soluções para este problema é notável. O modelo económico atual passa por diversos desafios relacionados com a poluição e a gestão de resíduos.

A economia circular emerge neste contexto com a promessa de ser uma saída para a antiga abordagem. Wysokinska (2016) define-a como “economia de ciclo fechado” que não gera resíduos em excesso e que transforma qualquer resíduo em recurso. Este modelo tem vindo a ser adotado a nível mundial por empresa e pelos próprios governos devido ao seu potencial na captação de valor económico junto com a promoção da sustentabilidade ambiental (Akinode & Oloruntoba, 2020). E segue principalmente o conceito do uso eficiente de recursos, fugindo ao modelo “usar-fazer-descartar” normalmente utilizado pelas empresas.

Com o passar dos anos, a digitalização tem se tornado uma nova força condutora para a economia circular (Akinode & Oloruntoba, 2020). A denominada “Quarta Revolução Industrial” caracterizada principalmente pelas novas tecnologias, em especial destaque para a IA, impulsionou ainda mais o conceito de economia circular.

IA lida com modelos e máquinas capazes de desempenhar funções cognitivas semelhantes aos humanos, sendo capaz de atualmente realizar funções como o reconhecimento de padrões, previsão, otimização e elaboração de recomendações baseadas em dados em diversos formatos (Akinode & Oloruntoba, 2020). No contexto da economia circular seria capaz de auxiliar em aspetos como a otimização das infraestruturas, melhorando diversos processos como a triagem ou a reciclagem de materiais, e como os próprios modelos de negócio circulares, melhorando a sua eficiência através da análise de dados em tempo real, análises preditivas e previsões.

A relação entre economia circular e IA ainda esta a ser estudada, mas o potencial que existe é claro. Com base nisto, o tema proposto para a elaboração da dissertação é “O papel da Inteligência Artificial no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular”. A motivação principal será não só expor estes dois conceitos, mas também entender a sua relação e o seu papel na sociedade atual

A relação entre economia circular e IA tornou-se um tópico de estudo e rapidamente percebeu-se o claro potencial desta relação.

Tendo em conta o contexto descrito, foi definida a seguinte questão orientadora desta investigação:

1. De que forma a inteligência artificial pode apoiar as empresas na transição para a economia circular, quais são os principais usos e tecnologias em aplicação, e que desafios emergem na sua implementação?

Esta questão tem como objetivo orientar a investigação no sentido de compreender o papel de IA no apoio à economia circular dentro das organizações, analisando os seus usos mais comuns, as tecnologias subjacentes e as dificuldades encontradas.

Com base nas questão apresentada, foram definidos os seguintes objetivos:

1. Identificar as principais tecnologias e os principais usos da IA no contexto da economia circular;
2. Identificar os desafios associados com o uso da IA no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular;
3. Analisar casos de empresas em Portugal que utilizam IA no contexto da economia circular.

Desta forma, esta dissertação pretende oferecer uma visão abrangente e atualizada sobre a integração de IA na economia circular, procurando contribuir com evidências que auxiliem empresas e decisores na adoção de práticas mais sustentáveis, baseadas em dados e inovação tecnológica.

Para atingir estes objetivos, optou-se por uma abordagem qualitativa através da realização de entrevistas semiestruturadas com representantes de empresas portuguesas reconhecidas na área da sustentabilidade, de modo a obter perspetivas práticas e aprofundadas sobre o uso da IA e os desafios associados em casos práticos. A análise dos dados empíricos foi conduzida com base numa análise temática de forma a identificar tópicos de interesse com base na literatura estudada e nos objetivos estabelecidos.

A estrutura da presente dissertação irá contar com mais seis capítulos além deste da introdução: Revisão de literatura onde são apresentados os conceitos fundamentais de economia circular e IA, explora a relação entre ambos e a literatura existente sobre esta mesma relação; Abordagem metodológica que descreve o enquadramento da investigação, a metodologia adotada, o processo de recolha de dados e os procedimentos

de análise.; Apresentação de resultados onde é sistematizado os principais resultados obtidos durante este trabalho; Discussão dos resultados referente à interpretação crítica dos resultados obtidos com base nas entrevistas realizadas, relacionando-os com os dados e conceitos explorados, estruturada em torno dos principais eixos identificados na investigação; e por fim a Conclusão que apresenta as principais conclusões, limitações do estudo e propostas para futuras investigações. Com esta estrutura, pretende-se oferecer uma visão integrada e crítica sobre o potencial da IA na promoção de práticas empresariais mais sustentáveis, contribuindo para o debate académico e prático em torno deste contexto.

## **CAPÍTULO II – REVISÃO DE LITERATURA**

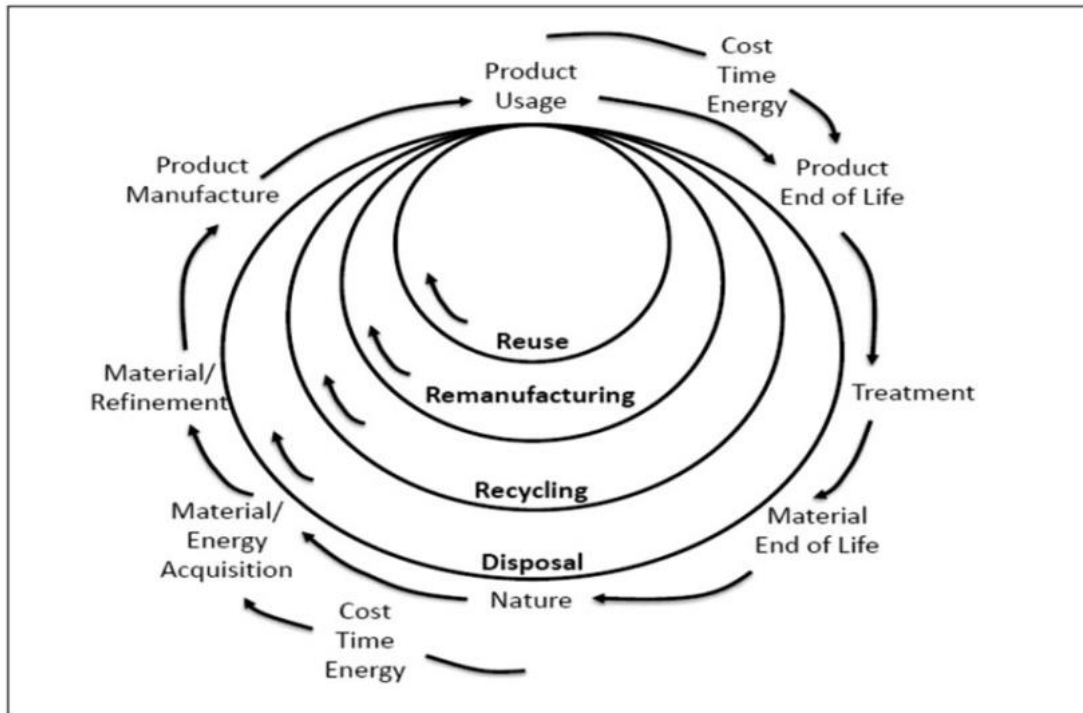
---

## 2.1 Economia Circular

O conceito de economia circular tem vindo a afirmar-se cada vez mais como uma alternativa ao modelo tradicional de produção e consumo, com o objetivo de promover um desenvolvimento económico mais sustentável baseado num uso mais eficiente dos recursos. Economia circular fundamenta-se em diversos princípios como a minimização de resíduos e a reutilização de materiais, visando prolongar o ciclo de vida dos produtos e dos recursos de forma a tentar reduzir o impacto ambiental das atividades económicas (Barros et al., 2021).

Este conceito origina dos anos 70 surgindo da ideia de reduzir o consumo na área da produção industrial, propondo uma mudança do paradigma da economia linear comum da altura “extrair-produzir-eliminar” (Arruda et al., 2021). Prieto-Sandoval et al. (2018) definem economia circular como “um sistema económico que representa uma mudança de paradigma na forma como a sociedade humana está inter-relacionada com a natureza e visa evitar o esgotamento dos recursos, fechar os ciclos de energia e materiais e facilitar o desenvolvimento sustentável ...” (tradução do autor), de um modo geral, os fundamentos deste modelo giram em torno da conceção de produtos que acrescentem valor através da sua versatilidade de usos, da possibilidade de reutilização e do seu consequente tempo de vida útil mais longo, da gestão dos resíduos do setor industrial e da gestão da cadeia de abastecimento, relacionando a energia utilizada, os materiais utilizados e o ambiente (Arruda et al., 2021).

A economia circular visa maximizar a produção através do ciclo linear de materiais e energia “natureza-sociedade-natureza” recorrendo a fluxos cíclicos de materiais (Figura 1) e fontes de energia renováveis, alinhando os processos económicos com limites naturais do planeta e gerando um equilíbrio entre as dimensões ambiental, social e económico do desenvolvimento sustentável (Korhonen et al., 2018). Atualmente, é vista como uma abordagem contemporânea capaz de integrar a atividade económica e o bem-estar ambiental, opondo-se ao modelo linear anteriormente referido (Tutore et al., 2024).



**Figura 1-** Conceito de Economia Circular

**Fonte:** Korhonen et al. (2018)

Este conceito tem se popularizado ao longo dos anos sendo reconhecido por investigadores, empresas e governos (Tutore et al., 2024) e sendo provido através de políticas públicas em países como a China (Prieto-Sandoval et al., 2018). No entanto, a implementação deste novo modelo exige transformações nos modelos tradicionais das empresas e novas formas de planejamento estratégico, o que pode dificultar a sua implementação em certos contextos.

## 2.2 Inteligência Artificial

IA pode ser definida como um ramo proveniente da ciência e da engenharia com o principal objetivo de desenvolver sistemas capazes de replicar diversos aspectos da inteligência humana. O termo foi introduzido em 1956 em Dartmouth na “Dartmouth AI conference” (Kang et al., 2024).

IA procura reproduzir, através do uso de tecnologia, certas capacidades humanas, como a aprendizagem, o raciocínio ou a percepção (Yang & Siau 2018). Esta definição integra-se num quadro mais abrangente onde se destacam outras áreas que possuem uma relação

sinérgica no contexto de IA como a análise de dados, machine learning e Big Data (Sestino & De Mauro, 2022).

A essência de IA reside sobre a capacidade de aprender conforme os dados que são fornecidos, conseguindo adaptar-se a diferentes contextos de forma flexível. O conceito de inteligência está diretamente relacionado com a capacidade intelectual humana, entendida como a capacidade de resolver problemas e a capacidade de adquirir e entender novo conhecimento, competências e experiências (Kang et al., 2024). O desenvolvimento de sistemas capazes de replicar o pensamento humano exige a análise das atividades cognitivas fundamentais, Kang et al. (2024) refere que “Para criar uma máquina que pense como os humanos, é necessário estudar os pensamentos e comportamentos humanos, incluindo ouvir, falar, ver e agir” (tradução do autor), ao fazer esta modelagem cognitiva torna possível representar computacionalmente o raciocínio humano.

Ao longo dos anos, IA teve diversas abordagens, destacando-se as seguintes (Kang et al., 2024):

- “*Think like humans*”: A abordagem de modelação cognitiva que procura desenvolver modelos que imitem o pensamento humano e os processos de tomada de decisão, por parte dos investigadores Hodgeland em 1985 e Bellman em 1978;
- “*Think rationally*”: Baseada numa abordagem de “lei do pensamento”, envolvendo um modelo de cálculo capaz de realizar tarefas mentais como a percepção e o raciocínio, por parte de Charniak e McDermott em 1985 e Winston em 1992;
- “*Act like humans*”: Baseia-se no “teste de Turing”, proposto por Alan Turing em 1950 e que determina se uma máquina possui inteligência ao avaliar a sua capacidade de comunicação com humanos;
- “*Act rationally*”: Utiliza uma abordagem “reasonable agent”, definida por Schalkoff em 1990 e Luger e Stubblefield em 1993, que permite um sistema agir de forma inteligente e executar tarefas de uma pessoa com o objetivo de obter os melhores resultados de uma forma racional.

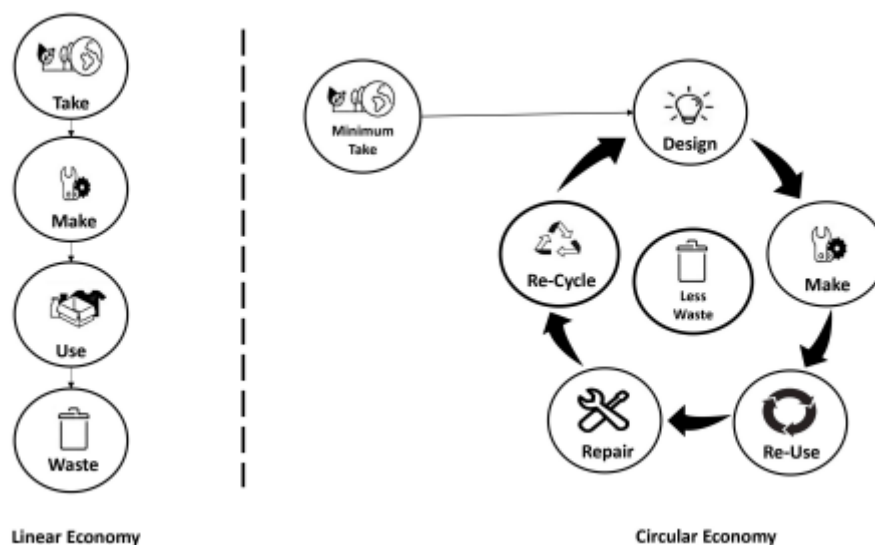
Dum ponto de vista filosófico IA pode ser dividida em duas categorias principais: “IA forte” e “IA fraca”. IA fraca engloba os sistemas desenvolvidos para executar tarefas específicas baseados em regras e algoritmos pré-definidos, incapazes de pensar ou resolver problemas sozinhos (Kang et al., 2024), como os sistemas de tradução automática e certos

assistentes virtuais. IA forte inclui a “Inteligência Artificial Geral”, referente a IA que pode ser aplicada a todas as situações, pois é capaz de aprender e realizar coisas que nunca fez antes, sendo este o objetivo que os investigadores que atuam no ramo de IA pretendem atingir, desenvolver máquinas baseadas em IA capazes de realizar qualquer tarefa intelectual da mesma forma que os humanos (Kang et al., 2024).

Atualmente, o avanço de IA está diretamente ligado à transformação digital nas organizações, o impacto que causa é claramente visível não só a automação de processos, mas também na criação de valor estratégico. Mas o seu futuro ainda está aberto para debate, se por um lado mais otimista IA permite amplificar as capacidades humanas e atuar sobre situações e problemas complexos, um outro lado encontra-se mais apreensivo e preocupado pelos problemas que surgem com a sua utilização relativamente ao impacto que terá nas empresas. Haenlein e Kaplan (2019) referenciam autores como Huang, Rust e Maksimovic e os seus trabalhos que salientam o desequilíbrio que IA pode causar nas tarefas mecânicas e cognitivas nas empresas, levando a uma redefinição do papel humano nas mesmas. Assim, a reflexão sobre os limites e as oportunidades da IA deverá acompanhar os avanços tecnológicos, promovendo sempre uma integração ética e responsável desta tecnologia na sociedade.

### **2.3 Relação entre Economia Circular e Inteligência Artificial**

A transição de um modelo económico linear para uma economia circular representa um desafio complexo para as empresas e exigem a reformulação de processos, produtos e modelos organizacionais (Figura 2). Como referido, a economia circular propõe uma abordagem diferente que visa manter os recursos em uso durante o máximo tempo possível nas empresas, promovendo a redução de desperdícios, reutilização de materiais e a sustentabilidade de um modo geral. Devido às suas capacidades, IA surge neste contexto como uma possível elemento facilitador nesta transição.



**Figura 2-** Comparação entre Economia Linear e Economia Circular

**Fonte:** Pathan et al. (2023)

IA devido à sua capacidade de simulação de competências cognitivas humanas, tem se consolidado como uma peça central para lidar com sistemas dinâmicos, baseados em dados de larga escala presentes nas empresas. No contexto da economia circular, IA fornece apoio através da otimização de processos, automatização de tarefas repetitivas, identificação de padrões de consumo e de produção e a capacidade de realizar análises preditivas (Tutore et al., 2024).

A estrutura ReSOLVE (*Regenerate, Share, Optimize, Loop, Virtualize, Exchange*) desenvolvida pela Ellen MacArthur Foundation & McKinsey Center for Business (2015) and Environment é frequentemente utilizada para operacionalizar os princípios da economia circular, dividindo-os nas seguintes 6 etapas fundamentais: *Regenerate* que assenta sobre um conjunto de ações que pretendem manter e melhorar a capacidade biológica do planeta ao, por exemplo, restaurar e proteger ecossistemas; *Share* relacionada com a exploração eficiente do uso de bens, fazendo com que a propriedade de um produto não esteja relacionada com o seu valor; *Optimize* relacionada com a melhoria na eficiência dos recursos, componentes e materiais utilizados; *Loop* que visa manter os recursos em “loops” fechados de forma a evitar o desperdício; *Virtualize* com ações que promovem a entrega de valor sem necessidade de materializa-lo; por fim, *Exchange* relacionado com o desenvolvimento e uso de novas tecnologias que melhorem

a produção de bens e serviços (Tutore et al., 2024). IA é capaz de auxiliar diretamente a concretização de cada uma destas etapas ao, por exemplo permitir melhorar a eficiência dos materiais usados que se relaciona com a etapa de *Optimize*, ou ao apoiar o reaproveitamento de recursos, diretamente ligado à etapa de *Loop*.

Ao permitir uma gestão mais eficiente e precisa dos recursos e uma maior capacidade de antecipação nas empresas por parte de diversos tipos de análise, IA facilita a transição para modelos empresariais assentes em partilha, reutilização e sustentabilidade (Ali, Zain, Hasar et al., 2024). Desempenhado assim, um papel estruturante na viabilização de um modelo de negócio baseado nos princípios da economia circular ao fornecer capacidades que, quando estrategicamente orientadas, podem auxiliar e acelerar esta transição vivida nas empresas.

## **2.4 Revisão Sistemática da Literatura**

Para garantir rigor e transparência na seleção e análise dos estudos científicos, durante este estudo adotou-se uma Revisão Sistemática da Literatura. Este tipo de revisão permite identificar, avaliar e sintetizar a literatura existente de forma estruturada e replicável. A abordagem presente neste trabalho foi baseada nas diretrizes propostas por Linnenluecke, Marrone e Singh (2020), que oferecem um enquadramento detalhado para a condução de revisões sistemáticas e análises bibliométricas.

Segundo os autores, uma revisão sistemática deve seguir uma sequência clara das seguintes etapas: (I) Identificar a literatura a incluir (II) Limpar os dados obtidos (III) Analisar e sintetizar os dados e (IV) Apresentar os resultados obtidos. Estas diretrizes a seguir visam garantir a validade do processo de recolha e análise dos documentos incluídos nesta investigação, permitindo ainda a reprodutibilidade dos procedimentos adotados.

### **2.4.1 Identificação de literatura para inclusão**

Antes de começar uma revisão sistemática de literatura, Linnenluecke, Marrone e Singh (2020) mencionam a importância de clarificar o tópico e/ou questões orientadoras da investigação. Este passo já foi concluído e explicitado no tópico 5. Seguidamente, é importante estabelecer as fontes a utilizar e os termos e critérios de pesquisa apropriados.

Esta pesquisa foi conduzida em inglês utilizando três fontes distintas, ScienceDirect, Web of Science e B-ON, estes dois últimos acedidos utilizando a VPN disponibilizada pelo

ISCAP. Foram utilizados os seguintes termos e operadores booleanos "Circular Economy" AND ("Artificial Intelligence" OR "AI"), juntamente com opções de pesquisa avançada relativas ao título, abstract e/ou palavras-chave quando possível.

As pesquisas foram realizadas em janeiro e fevereiro de 2025. No ScienceDirect foram aplicados filtros relativamente ao título através da ferramenta de pesquisa avançada disponível, resultando na seguinte expressão de pesquisa e em 10 resultados obtidos:

Title: "Circular Economy" AND ("Artificial Intelligence" OR "AI")

Relativamente à Web of Science foram obtidos 27 resultados utilizando as ferramentas de pesquisa avançada relativamente ao título, abstract e palavras-chave:

"Circular Economy" AND ("Artificial Intelligence" OR "AI") (Title) and "Circular Economy" AND ("Artificial Intelligence" OR "AI") (Abstract) and "Circular Economy" AND ("Artificial Intelligence" OR "AI") (Author Keywords)

Por fim, B-ON gerou 41 resultados ao utilizar também as ferramentas de pesquisa avançada disponíveis relativas ao título, resumo e palavras-chave:

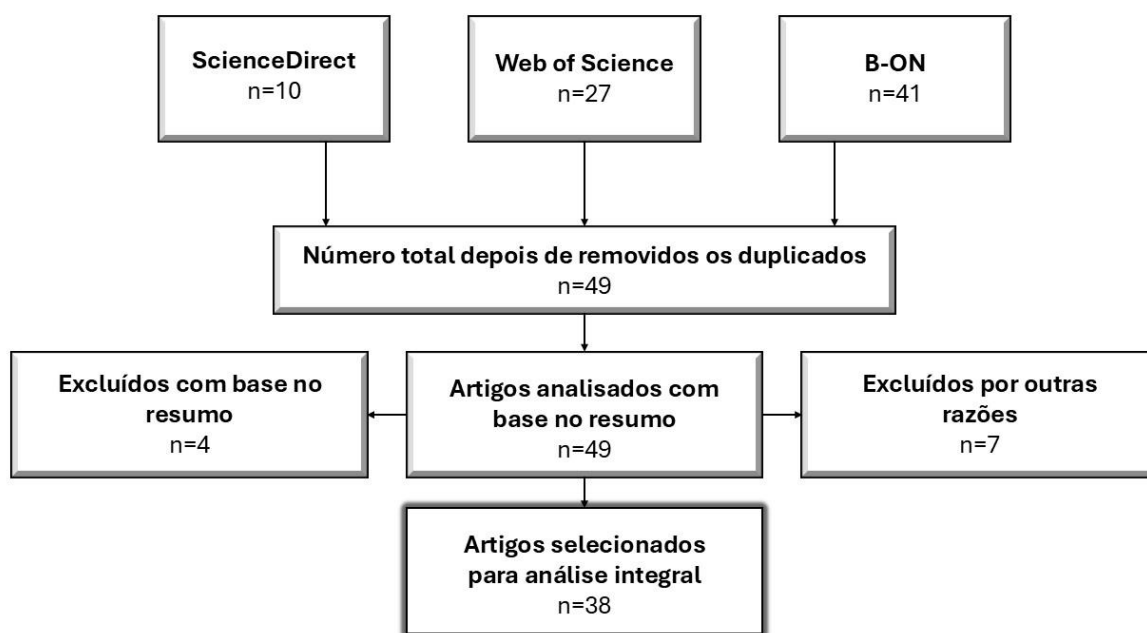
(TI ("Circular Economy" AND ("Artificial Intelligence" OR "AI"))) AND (AB ("Circular Economy" AND ("Artificial Intelligence" OR "AI"))) AND (SU ("Circular Economy" AND ("Artificial Intelligence" OR "AI")))

Filtros relativos à data de publicação foram utilizados inicialmente, de forma a incluir apenas publicações dos últimos 10 anos, mas isso provou-se desnecessário pois as publicações mais antigas datavam de 2019.

Esta primeira fase resultou em 78 possíveis artigos de interesse para o contexto deste estudo.

## 2.4.2 Limpeza de dados

Após a recolha dos documentos, a próxima etapa descrita por Linnenluecke, Marrone e Singh (2020) envolve a limpeza dos dados, etapa esta que visa identificar resultados duplicados e irrelevantes (falsos positivos) de maneira que não sejam incluídos erradamente no estudo.



**Figura 3-** Processo de seleção e inclusão de artigos para o estudo

**Fonte:** Elaboração própria

Inicialmente foram removidos 29 resultados duplicados entre as fontes utilizadas, reduzindo o número total para 49. Em seguida, foi feita uma triagem com base numa análise dos resumos, resultando em mais 4 resultados excluídos por não incidirem completamente sobre o tema de estudo deste trabalho ou focarem em outros domínios exclusivamente técnicos como a engenharia. 1 resultado do ScienceDirect foi excluído por ser um capítulo de um livro. Além disso, no caso do B-ON foram excluídos mais 3 resultados por serem atas e mais 3 por causa da linguagem que, apesar de apresentarem títulos, palavras-chave e resumos em inglês, o resto do artigo não o era.

A amostra final resultou assim em 38 resultados para análise integral.

### 2.4.3 Análise e síntese

Conforme proposto por Linnenluecke, Marrone e Singh (2020), a análise e síntese da literatura pode ser efetuada de forma qualitativa ou quantitativa, dependendo do volume e natureza dos estudos incluídos. Neste estudo e com base nos objetivos proposto inicialmente, o objetivo era identificar os principais usos de IA, as principais tecnologias utilizadas e os principais desafios que as empresas enfrentam, tudo isto no contexto da economia circular. Para isto foi feita uma análise qualitativa de cada documento obtido de forma a identificar esses três pontos.

### 2.4.4 Apresentação dos resultados

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e a análise integral dos 38 artigos selecionados (Apêndice I) com o objetivo de identificar possíveis usos e tecnologias de IA utilizadas em contexto empresarial, além dos desafios que estas enfrentam, os dados foram organizados com base nessas três dimensões: Principais usos de IA identificados (Tabela 1); Principais tecnologias de IA identificados (Tabela 2); Principais desafios identificados (Tabela 3).

Principais usos	Nº de artigos
Análise de dados	38
Desenvolvimento de modelos de negócio	36
Design de produtos	21
Triagem	16
Gerar KPIs	13
Chatbots	6
Precificação automática de produtos	5

**Tabela 1-** Principais usos de IA identificados e a sua frequência

A análise revelou que a IA tem sido amplamente utilizada em diversas fases das estratégias circulares. Os usos mais recorrentes envolvem:

- **Análise de dados:** uso base da IA das quais quase todas as suas funções dependem, evidenciando o papel central de IA na recolha, processamento e interpretação de grandes volumes de dados;

- **Desenvolvimento de modelos de negócio:** IA pode ser considerada um elemento importante na criação de estratégias mais sustentáveis, baseadas nas práticas propostas na economia circular;
- **Design de produtos:** muitas aplicações visam apoiar decisões no design mais sustentável e prolongamento do ciclo de vida dos produtos;
- **Triagem de materiais/resíduos:** algoritmos e visão computacional são usados para reconhecer, separar e reaproveitar materiais;
- **Geração de KPIs:** alguns estudos destacaram a utilização da IA para definir e acompanhar KPIs (Key Performance Indicators) em iniciativas circulares, permitindo o monitoramento contínuo de metas ambientais, como redução de resíduos, emissões ou consumo energético;
- **Chatbots:** foram identificadas aplicações de agentes conversacionais inteligentes, ou chatbots, como ferramenta de interação e conexão dos usuários com as plataformas de serviços circulares, proporcionando funcionalidades como uma assistência personalizada ao cliente.
- **Precificação automática:** IA pode ser empregue na definição dinâmica de preços para produtos e serviços circulares, considerando variáveis como tempo de uso, condição do produto, procura, e valor de reposição. Esta abordagem favorece a sustentabilidade económica em modelos de reutilização ou revenda;

Principais tecnologias	Nº de artigos
Machine Learning	36
Sensores Inteligentes	26
Deep Learning	21
Computer Vision	15
Natural Language Processing	15
Generative Artificial Intelligence	11

**Tabela 2-** Principais tecnologias de IA identificadas e a sua frequência

As tecnologias mais frequentemente mencionadas nos artigos incluem:

- **Machine Learning (ML):** presente em diversos documentos, é a base de praticamente todas as aplicações analisadas;

- **Sensores inteligentes / IoT:** usados para recolher dados em tempo real sobre processos, produtos e resíduos;
- **Deep Learning:** utilizada para análise preditiva e reconhecimento de padrões complexos;
- **Computer Vision :** aplicada, sobretudo, em triagem e reconhecimento de objetos;
- **Natural Language Processing (NLP):** utilizada para interpretar textos, relatórios ou comunicações automatizadas;
- **Inteligência Artificial Generativa (GenAI):** tecnologia mais recente, utilizada para gerar novos dados em diversos formatos, normalmente aplicada nas empresas em tarefas relacionadas com o design.

Principais desafios	Nº de artigos
Qualidade dos dados	32
Custos	31
Falta de competências no uso de IA	26
Ética	22
Segurança dos dados	18

**Tabela 3-** Principais desafios identificados e a sua frequência

Por fim, os artigos analisados também evidenciam vários obstáculos à implementação eficaz da IA em contextos circulares:

- **Qualidade dos dados:** a maior parte dos artigos apontam preocupações na obtenção de dados fiáveis, completos e atualizados;
- **Custos:** associados à aquisição de tecnologia, integração de sistemas e formação;
- **Falta de competências técnicas:** falta de profissionais especializados em IA;
- **Questões éticas:** preocupações com transparência algorítmica, vieses e uso indevido de dados;
- **Segurança dos dados:** riscos relacionados com cibersegurança, proteção de informação e privacidade.

Todos estes pontos identificados serão explicados em detalhe nos pontos seguintes.

## **2.5 Principais usos de Inteligência Artificial identificados**

### **2.5.1 Design de Produtos**

Quando são utilizadas tecnologias de fabrico que envolvam a aplicação de maquinaria avançada e/ou a utilização de informação, encontram-nos numa situação de “Intelligent/smart manufacturing” (fabrico inteligente), definido como um modelo mais moderno que usufrui do uso de tecnologias inteligentes e do conhecimento científico existente para atualizar significativamente os projetos, produção e a própria gestão com foco nas transações de produtos e na sua otimização (Ghoreishi & Happonen, 2020).

Indústria 4.0 é descrita como o próximo passo no que toca ao processo de produção de produtos que está a ganhar cada vez mais destaque devido ao nível mais elevado de digitalização e a utilização de novos modelos e tecnologias (Ghoreishi & Happonen, 2020). IA é capaz de proporcionar funcionalidades como um nível de aprendizagem e raciocínio mais avançado e um tempo de atuação mais rápido do sistema que, junto com as competências humanas, são capazes de aumentar a eficiência do trabalho, mesmo em situações mais complexas.

Avanços como estes desempenham um papel importante na crescente automatização e digitalização das empresas, causando uma mudança dos métodos tradicionais para algo mais inteligente.

No contexto da economia circular, os produtos são pensados de forma que tenham uma vida útil longa e as suas componentes possam ser recicladas ou reutilizadas, mantendo sempre a utilidade e valor original do produto (Pathan, Richardson, Galvan, & Mooney, 2023). IA pode ser utilizada nesta atividade como auxílio na idealização do design dos produtos ao ser capaz de fazer sugestões ou ajustes de design com base em parâmetros ambientais e/ou considerações que tenham sido fornecidas (Roberts, Zhang, Bariach, et al., 2024).

Considerando estes aspetos, IA pode também ser utilizada pelos responsáveis pelo design e conceção dos produtos na criação de protótipos e diferentes versões dos mesmos de uma forma mais rápida, acelerando este processo e aumentando a eficiência destas atividades (Ghoreishi & Happonen, 2020). IA é capaz mesmo de conceber novos materiais que podem atuar como substitutos para outros considerados não sustentáveis ou que

apresentam uma durabilidade menor ou uma dificuldade no processo de reciclagem (Roberts, Zhang, Bariach, et al., 2024).

Desta forma, novos produtos surgem, produtos circulares, capazes de serem mantidos e preservados durante períodos mais longos, resultando em uma quantidade de resíduos proveniente do processo de produção de produtos mais reduzida (Pathan et al., 2023) e uma consequente redução nos custos devido à melhor utilização dos materiais disponíveis (Mankar et al., 2024).

### **2.5.2 Análise de dados**

A análise de dados constitui uma das utilizações essenciais da IA, principalmente em contexto empresarial. A capacidade de recolher, processar e interpretar grandes volumes de dados, inclusivamente em tempo real, que IA possui demonstra ser uma ferramenta crítica na otimização de processos, capacidades de previsão, mapeamento dos fluxos de materiais e melhoria dos processos de tomada de decisão.

IA tem sido aplicada em diversos setores de forma a monitorizar sistemas de produção, prever padrões de consumo e antecipar as necessidades logísticas. Na gestão de resíduos, por exemplo, algoritmos são utilizados para prever padrões de produção de resíduos (Lanzalonga et al., 2024), na melhoria da pegada ambiental da empresa, modelos preditivos e analíticos baseados em IA permitem que os recursos sejam utilizados de forma mais eficiente e consequentemente haja menos resíduos produzidos (Mankar et al., 2024). Além disso, Tutore et al. (2024) argumenta que IA ao permitir coletar e processar os diversos dados gerados na empresa de forma contínua, torna mais fácil a reconfiguração de modelos de negócio baseados na economia circular.

Este uso ultrapassa a lógica operacional, pois a análise de dados viabilizada por IA promove o avanço em termos de acesso, qualidade e confiabilidade da informação dentro das empresas. As suas capacidades de automatizar a recolha, validação e organização de dados, principalmente em grandes quantidades, ajudam na democratização destes, permitindo que diversos atores, mesmo aqueles com níveis técnicos mais baixos possam extrair algum tipo de informação de conjuntos complexos de dados (Mehdipour,2024).

Análise de dados revela-se um instrumento estratégico central para a operacionalização da economia circular nas empresas. A sua aplicação vai além da eficiência técnica, representando um catalisador para a transformação digital e a inovação sustentável. Ao

permitir que decisões sejam tomadas com base em informação precisa, atualizada e acessível, IA reforça a capacidade das empresas para responder de forma dinâmica aos desafios ambientais, económicos e sociais associados à adoção de princípios da economia circular.

### **2.5.3 Sistemas de Triagem**

Durante os últimos anos não só a quantidade mas até mesmo o tipo de resíduos tem mudado principalmente devido ao surgimento de materiais sintéticos como o plástico (Kowsari et al., 2023). O plástico em si tornou-se rapidamente um dos materiais mais utilizados das últimas décadas e contribui bastante para o crescimento económico mundial.

Como referido, um dos aspetos que o modelo da economia circular tenta combater é a poluição, promovendo a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos e o denominado “desenvolvimento sustentável”. De acordo com Agrawal et al. (2021) este modelo é considerado “o sistema económico sustentável em que o desenvolvimento económico está dissociado da utilização dos recursos através da recirculação e redução dos recursos naturais” (tradução do autor).

Gestão de resíduos é um dos aspetos mais importantes da economia circular e é chave para alcançar uma melhor utilização de recursos e prevenir o desperdício (Agrawal et al., 2021). E é neste aspeto que mais uma vez a IA pode auxiliar, graças à habilidade de reconhecimento de padrões IA é capaz de auxiliar no processo de triagem que envolve a separação dos resíduos. Ao analisar grandes volumes de dados relacionados com os objetos que surgem neste contexto, IA é capaz de separar os resíduos, por exemplo os vidros dos plásticos e até mesmo separar aqueles que podem ser reciclados daqueles que não podem (Sigüenza Tamayo, Uriarte-Gallastegi, Landeta-Manzano, & Arana-Landin, 2023). Existem casos onde esta capacidade de reconhecimentos de padrões usando IA foi combinado com o uso de robótica criando um sistema capaz de realizar tarefas simples e repetitivas de forma automática como a triagem dos resíduos.

O estudo realizado por Sigüenza Tamayo, Uriarte-Gallastegi, Landeta-Manzano e Arana-Landin (2023) demonstrou que a utilização de IA e, ocasionalmente, robótica tem demonstrado bons resultados e causando impacto nos aspetos de reutilização, recuperação e reciclagem.

Ao realizar o processo de triagem de uma forma mais eficiente e coerente graças à aplicação de IA, as empresas conseguem alcançar uma redução do volume de desperdícios que produzem, além de uma utilização mais eficiente dos materiais disponíveis o que resultará em uma produção mais eficiente e uma redução de custos relacionados à aquisição de materiais de produção.

#### **2.5.4 Chatbots**

A interação entre IA e humanos tem sido um objeto de estudo há muito tempo e, atualmente, já é possível mesmo presenciar uma conversa normal entre ambos. Isto tornou-se uma possibilidade devido ao “Natural Language Processing” (Processamento de Linguagem Natural) ou NLP que permite ao computador entender e interpretar a linguagem humana. Algoritmos com base em NLP são usados como forma de extrair significado de textos (Akinode & Oloruntoba, 2020).

A utilização desta tecnologia permitiu a criação de “chatbots”, bots desenhados com o objetivo de interagirem com humanos e serem capazes de conversar. Estes já são usados há algum tempo, como por exemplo o “Macy Shopping Assistant” introduzido em 2016 para facilitar as compras dos clientes em certas lojas (Rehman, 2024) ou o “Iio” utilizado na cidade de Yokohama no Japão para responder as perguntas dos seus habitantes sobre a reciclagem do seu lixo (Cîmpeanu, Dragomir, & Zota, 2022).

Chatbots têm demonstrado ser um ótimo ponto de interação entre IA e humanos e são um recurso prático para empresas que lidam com a interação com os seus clientes, contudo o uso deste tipo de tecnologia apresenta sempre algumas implicações como a necessidade de profissionais responsáveis por estes sistemas de IA e as questões éticas e de segurança relacionados com as informações recebidas pelos bots (Rehman, 2024). É importante avaliar o estado atual desta tecnologia e estudar casos reais como “Iio” e outros de forma a melhorá-la e aumentar ainda mais o seu potencial na interação humana.

#### **2.5.5 Modelos de negócio circulares**

O desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis exige bastante das empresas, é necessário gerir diversos processos empresariais, IA é capaz de fornecer suporte a negócios que se encaixam no âmbito da economia circular de diversas maneiras.

É capaz de auxiliar no desenvolvimento de modelos circulares inovadores, como por exemplo uma precificação dinâmica de produtos baseada em IA. Por estamos inseridos

no contexto da economia circular, os serviços fornecidos e os produtos vendidos dificilmente seguirão os preços base associados, dada a multiplicidade de variáveis que podem afetar o preço final (Roberts et al., 2024). Para fazer frente a essa complexidade, são usados algoritmos capazes de analisar diversas variáveis como a idade do produto e a sua condição atual, adaptando o preço final com base nestes fatores de forma consistente e eficiente. Estes sistemas não apenas aumentam a eficiência comercial, como também reforçam a relação entre fornecedores e consumidores, promovendo um modelo de consumo mais transparente e ajustado à realidade dos bens circulares (Gailhofer et al., 2021).

Igualmente, IA também consegue fornecer auxílio com elementos infraestruturais necessários, possibilitando a otimização de recursos, o aumento da eficiência energética e a redução de desperdícios em processos produtivos, de forma a garantir que os recursos subjacentes à própria empresa sejam igualmente sustentáveis (Roberts et al., 2024). IA pode ser uma força facilitadora para as infraestruturas responsáveis pela reciclagem necessárias para funcionamento da economia circular.

No domínio da gestão de resíduos, a IA tem sido implementada em sistemas de triagem automática, utilizando tecnologias como Computer vision e sensores inteligentes capazes de identificar, classificar e separar materiais com elevada precisão. Esta automação não só reduz custos operacionais, como também aumenta a qualidade dos materiais reciclados, assegurando a sua reintrodução eficaz nos ciclos produtivos (Roberts et al., 2024). Em paralelo, a integração de IA permite também o desenvolvimento de sistemas de rastreamento para os materiais utilizados, o que possibilita o acompanhamento de produtos desde a produção até ao seu descarte ou reutilização. Esta transparência proporcionada é fundamental para assegurar práticas circulares consistentes, garantindo a responsabilidade e a conformidade com as normas ambientais (Gailhofer et al., 2021).

Por fim, importa salientar o potencial da IA como ferramenta de apoio à decisão estratégica nas organizações. Ao combinar dados ambientais, sociais e económicos, os sistemas baseados em IA possibilitam a previsão de futuros cenários e a avaliação das opções disponíveis e as suas consequências, promovendo decisões que se alinhem com os princípios da economia circular. Este suporte fornecido por IA pode ser crucial na integração destes princípios na estratégia da empresa (Roberts et al., 2024).

## **2.6 Principais tecnologias de Inteligência Artificial identificadas**

### 2.6.1 Machine Learning (ML)

“*Machine Learning*”, ou Aprendizagem automática, é uma das principais e mais reconhecidas subáreas da IA focada na criação da possibilidade de permitir que sistemas aprendam com os dados que lhe são fornecidos, ou seja, que não fiquem somente “presos” às tarefas que foram especificamente programadas e possam ir mais além. De acordo com Shinde e Shah (2018), ML pode ser descrito como o estudo de algoritmos e modelos estatísticos usados pelos sistemas computacionais para realizar tarefas de forma autónoma, usando padrões e informação extraída de grandes volumes de dados.

O desenvolvimento inicial de ML data à década de 1940, quando Alan Turing e Champernowne foram capazes de conceber o xadrez “paper and pencil”, o primeiro programa de computador capaz de jogar xadrez (Shinde e Shah, 2018). Os avanços continuaram nas décadas seguintes com um dos primeiros programas de IA a incorporar “learning” (aprendizagem) escrito por Anthony Oettinger, denominado “Response learning programme” e “Shopping programme” por ser capaz de reproduzir o comportamento de uma criança a fazer compras (Shinde e Shah, 2018). ML foi evoluindo de técnicas mais simples como a regressão linear e as árvores de decisão para abordagens mais robustas e sofisticadas como as redes neurais, SVM (*Support Vector Machines*), *Random Forests*, k-NN (*k-Nearest Neighbour*) e outros que foram sendo desenvolvidos nas últimas décadas (Shinde e Shah, 2018).

Aplicado ao contexto da economia circular, ML tem sido aplicado de diversas maneiras como a análise de grandes volumes de dados, com o objetivo de extrair tendências e padrões que permitam melhores e mais sustentáveis tomadas de decisão, a previsão do volume de resíduos gerados, a otimização de rotas logísticas e o desenvolvimento de designs de produtos de acordo com dados de consumo (Sigüenza Tamayo et al., 2023). Algoritmos de ML podem por exemplo ser usados para identificar padrões presentes em grandes volumes de dados relativos a vendas, procura e até mesmo características dos clientes, que auxiliam num aperfeiçoamento do design de produtos para que estes fiquem de acordo com as preferências dos clientes (Akhtar et al., 2024).

Ao aplicar ML as empresas aumentam a fiabilidade dos seus dados e conseguem informações que vão de acordo com as necessidades específicas dos seus clientes (Akhtar et al., 2024). ML aumenta a eficiência das empresas e possibilita melhores e mais informadas tomadas de decisão, justificando o seu lugar como uma das principais

tecnologias de IA utilizadas nas empresas. À medida que as infraestruturas digitais se tornam mais acessíveis e os dados cada vez maiores em quantidade e complexidade, espera-se que ML venha desempenhar um papel cada vez mais relevante na transição para modelos económicos mais sustentáveis.

### **2.6.2 Deep Learning (DL)**

“*Deep Learning*”, ou DL, é uma subárea do machine learning apresentado anteriormente baseada na utilização de redes neurais artificiais de múltiplas camadas ou redes neurais profundas (Shinde & Shah, 2018). Redes estas que permitem o processamento de grandes volumes de dados através das diversas camadas hierárquicas capazes de extrair características e padrões progressivamente mais complexos. Cada camada transforma os dados que recebe da camada anterior, o que possibilita a modelação de relações entre as mesmas (Shinde & Shah, 2018).

A melhoria da tecnologia utilizada em termos das suas capacidades computacionais e a quantidade de dados produzida e acessível cada vez maior impulsionaram o uso de DL ao longo dos últimos anos, expandindo os seus usos e consequentemente proporcionando um melhor treinamento para os modelos.

Shinde & Shah (2018) destacam que “deep learning é adequada analisar e extrair conhecimento útil tanto de grandes quantidade de dados como de dados recolhidos de diferentes fontes” (tradução do autor). Esta capacidade aplicada ao contexto da economia circular permite, por exemplo, a extração e análise automática de diferentes parâmetros e indicadores que representem o desempenho da empresa e o seu impacto ambiental, ou também o auxílio aos sistemas de previsão, ao ser capaz de elaborar estimativas de consumo e do ciclo de vida dos produtos.

### **2.6.3 Computer Vision**

Computer Vison (CV) é outra tecnologia de IA que tem demonstrado aplicações particularmente promissoras para a viabilização de práticas de economia circular. Esta tecnologia é voltada para o processamento, interpretação e extração de informações de forma automática a partir de imagens, vídeos e outros dados visuais ao permitir que máquinas sejam capazes de “ver” e compreender o ambiente ao seu redor identificando padrões, classificando objetos e extraíndo informações úteis (Agrawal et al., 2021).

No contexto da economia circular, CV tem se consolidado uma tecnologia útil para a automatização de tarefas visuais complexas, como a triagem automática de resíduos, onde pode ser utilizada em conjunto, por exemplo, com redes neurais *Convolutional neural network* (CNN) para o reconhecimento automático de materiais recicláveis como vidro, papel e plástico com base nas suas características visuais (Agrawal et al., 2021). Ou em outro contexto, CV pode ser empregada no controlo de qualidade de produtos novos e/ou reconicionados, como o caso apresentado por Rehman (2024) aplicado à indústria da moda, onde CV é integrada nas linhas de produção de forma a monitorar e identificar defeitos nos têxteis e possíveis desgastes ou alterações em tempo real que podiam passar despercebidos pelo olho humano.

Em síntese, a visão computacional representa uma tecnologia transversal, aplicável em múltiplas fases do ciclo de vida de produtos. O seu papel como “olhos” da IA torna-a indispensável para a automatização de processos da economia circular, elevar a qualidade dos materiais recuperados e reduzir a dependência de mão de obra intensiva em operações repetitivas. Ao atuar como uma interface sensorial entre o mundo físico e os algoritmos de IA, CV é capaz de potencializar diversas práticas circulares.

#### **2.6.4 Natural Language Processing (NLP)**

Natural Language Processing (NLP), ou Processamento de Linguagem Natural, é outra subárea da IA de destaque. Esta tecnologia concentra-se nas comunicações que existem entre computadores e seres humanos ao analisar a estrutura, a interpretação e as intenções presentes nas frases ditas por humanos (Ali, Zain, Hasar et al., 2024). A integração de NLP permite que sistemas consigam extrair conhecimento de dados textuais (Shinde & Shah, 2018), o que possibilita aplicações como os chatbots anteriormente referidos, traduções automáticas e sistemas de perguntas e respostas.

Segundo o estudo realizado por Ali, Zain, Hasar et al. (2024), NLP é uma das tecnologias emergentes aplicada nas empresas que está a permitir a transformação de práticas económicas ditas tradicionais em práticas circulares ao ser integrada como uma ferramenta estratégica capaz de facilitar a análise de dados não estruturados provenientes de diversas fontes que podem abranger desde relatórios técnicos até simples comunicações com stakeholders. Uma aplicação de NLP particularmente relevante no contexto da economia circular seria o modelo híbrido entre técnicas de NLP e especialistas proposto por Mboli et al. (2021) utilizado para definir e validar a ontologia

de modelos de negócio circulares ao identificar possíveis lacunas conceituais e permitir um melhor alinhamento com os princípios e práticas da economia circular. Além disso, esta tecnologia permitiu uma melhoria dos chatbots existentes que agora podem ser aplicados de forma a conectar mais os clientes com as empresas e até instruir estes sobre reciclagem e outros aspetos presentes na economia circular, como é exemplo do “Iio” no Japão mencionado numa das secções anteriores.

No entanto, apesar do seu potencial, o uso de NLP enfrenta desafios relevantes, nomeadamente a escassez de dados de treino em múltiplos idiomas, o que pode criar desigualdades no acesso ao conhecimento em contextos globais, devido à predominância do inglês como língua principal nas bases de dados que podem limitar a sua aplicabilidade em contextos regionais e locais, dificultando a disseminação de boas práticas circulares de forma equitativa (Ali, Zain, Hasar et al., 2024).

Concluindo, NLP demonstra ser uma tecnologia relevante na promoção da economia circular devido às suas aplicabilidades e da integração que traz entre sistemas e utilizadores. O seu desenvolvimento e aplicação contínuos, especialmente em conjunto com outras tecnologias como o ML, são essenciais para maximizar o seu impacto nas práticas empresariais e sociais sustentáveis.

### **2.6.5 Sensores Inteligentes**

A integração de sensores inteligentes em sistemas empresariais tem vindo a destacar-se na viabilização de modelos de negócios em conformidade com a economia circular. Estes sensores, frequentemente associados ao paradigma da *Internet of Things* (IoT) emergem como componentes essenciais para a recolha e análise de dados em tempo real. Ao servirem como “ponte” entre o ambiente físico e os sistemas analíticos alimentados por IA, esses sensores tornam possível o monitoramento contínuo de processos produtivos, cadeias de suprimentos e fluxos de resíduos.

Gestão de resíduos é um dos aspetos principais na qual a economia circular incide. No que toca a este domínio, estes sensores podem desempenhar um papel central. Alia Spa, uma empresa italiana, é um exemplo disto, ao utilizar sensores capazes de medir o volume de resíduos depositados nos contentores e aplicando, com os dados fornecidos, tarifas adaptadas à quantidade de resíduos devidamente descartados (Lanzalonga et al., 2024). Esta abordagem encoraja a redução de desperdício, além de fornecer dados para alimentar algoritmos de IA especializados na previsão de geração de resíduos.

Estes sensores podem ser aplicados de diversas maneiras e em diversas áreas de atuação, como a manufatura para captar diversas variáveis complexas de produtos como a vibração, temperatura e a presença de contaminantes, posteriormente processadas por algoritmos de ML para inferência sobre a sua vida útil restante, possibilidades de remanufatura e de reintrodução desses produtos no ciclo produtivo (Graessler et al., 2025), ou na área da moda ao implementá-los ao tecido ou às máquinas de costura, possibilitando o monitoramento da durabilidade, resistência e conformidade técnica das peças, estes dados, ao serem processados por modelos de IA, permitem adaptar os processos produtivos em tempo real, personalizar ofertas para consumidores e aumentar a vida útil dos produtos, facilitando modelos de negócio circulares como o aluguel de roupas e a produção sob demanda (Rehman, 2024).

Os sensores não servem só para captar informação do ambiente físico, eles alimentam modelos preditivos que permitem uma melhor tomada de decisão com base em dados históricos, padrões e previsões do futuro. Estes sensores inteligentes constituem uma tecnologia essencial para operacionalizar a economia circular com suporte de inteligência artificial. Tal como sublinhado por Graessler et al. (2025), a combinação dos sensores com sistemas e técnicas de IA oferecem uma “assistência à circularidade da informação” (*Information Circularity Assistance*), que apoia especialistas e responsáveis pelas decisões nas empresas na definição de produtos e processos mais sustentáveis desde a sua concepção.

### **2.6.6 Inteligência Artificial Generativa (GenAI)**

A Inteligência Artificial Generativa, ou GenAI como é normalmente denominada, é atualmente uma das vertentes mais promissoras da IA. Esta tecnologia utiliza modelos generativos, como os LLMs (*Large Language Models*), que possuem a capacidade de reconhecer e aprender padrões presentes em grandes volumes de dados e, com o conhecimento adquirido, serem capazes de gerar novos dados (Akhtar et al., 2024). Essencialmente GenAI contrasta com a IA tradicional pois não se limita por regras predefinidas ao vez disso, tenta replicar a criatividade e a própria adaptabilidade presente nos seres humanos, gerando novas ideias em forma de texto, imagens, vídeos, entre outros.

A capacidade de adaptação da GenAI torna-a particularmente útil em tarefas que envolvam a geração de imagens, vídeos ou texto ou a conversão de texto em algum dos

outros formatos. Akhtar et al. (2024) destaca que GenAI é capaz de “aumentar significativamente a produtividade, melhorar a qualidade do trabalho e aperfeiçoar ideias para a inovação no design de produtos, oferecendo uma perspectiva que substitui o trabalho árduo por trabalho inteligente” (tradução do autor). Além disso, machine learning pode ser integrado juntamente com GenAI como forma de melhorar a performance dos seus modelos tendo em conta os novos dados que lhe são fornecidos.

No âmbito da economia circular, as funcionalidades da GenAI podem assumir um papel estratégico na criação de produtos sustentáveis e otimizados para a sua reciclagem ou reutilização. A capacidade de gerar conteúdo com base em dados fornecidos permite, por exemplo, a elaboração de possíveis design para um novo produto com base em diversos parâmetros de interesse, como a durabilidade e os materiais utilizados na sua elaboração ou a adaptação e melhoria de produtos já existente conforme as ideologias incentivadas no contexto da economia circular.

## **2.7 Principais desafios identificados**

### **2.7.1 Segurança dos dados**

Segurança dos dados já é uma preocupação geral que existe na nossa sociedade, principalmente nesta era digital que vivemos. Esta preocupação encontra-se também presente quando falamos de IA, especialmente em ambientes organizacionais onde a partilha de informação é essencial ao longo de toda a cadeia de valor.

Quando uma empresa recorre ao uso de sistemas de IA, a segurança dos dados é um aspeto crítico que devo ter em consideração, esta segurança, que pode ser entendida como “o nível de fiabilidade do sistema e da tecnologia de informação no intercâmbio de dados e na execução de tarefas” (tradução do autor) influencia a disposição das empresas relativamente ao uso de IA (Ronaghi, 2023). É importante que os dados estejam protegidos contra acessos não autorizados ou possíveis vazamentos que podem acontecer e por questões de privacidade, principalmente em empresas que lidam com dados sensíveis relacionados aos seus clientes.

No contexto da economia circular, a colaboração e conectividade entre os diversos atores da cadeia logística de uma empresa é crucial para o sucesso deste modelo de negócio, no entanto esta conectividade pode apresentar riscos relativos à segurança dos dados, pois como cada um destes atores encontra-se neste “loop” junto com os restantes, basta um

ficar vulnerável por algum motivo para comprometer toda a rede (Roberts et al., 2024). A utilização de plataformas abertas e de tecnologias de IA acaba por levantar preocupações como estas relativas ao controlo e proteção dos dados que são utilizados, por isso, é crucial que o uso responsável dos dados seja ensinado e promovido nas empresas e até mesmo pelo próprio governo através de leis e regulamentações (Akhtar et al., 2024).

A segurança dos dados é um desafio transversal à implementação de IA, especialmente em empresas onde pode afetar todos os seus processos. A garantia de privacidade e de integridade informacional são aspetos essenciais para uma adoção responsável de IA nos modelos de negócio.

### **2.7.2 Qualidade dos dados**

A qualidade dos dados constitui um dos principais desafios no que toca à implementação de IA em qualquer contexto. O desempenho dos modelos de IA é uma reflexão direta dos dados que lhe são fornecidos, é importante que estes sejam amplos, representativos e principalmente de qualidade.

Contudo, a qualidade dos dados, em muitos casos, não é assegurada, são insuficientes, incompletos ou até encontram-se não estruturados, independente da razão, dados de má qualidade comprometem a qualidade e precisão dos resultados gerados pelos modelos de IA (Shennib & Schmitt, 2021).

A utilização de dados privados ou proprietários torna-se muitas vezes necessária, especialmente em ambientes industriais e comerciais. No entanto, o acesso a esses dados pode ser dificultado por questões legais, éticas, de privacidade ou por interesses comerciais, o que pode restringir o desenvolvimento de soluções de IA mais robustas (Petrik & Härer, 2024). Além disso, a falta de padronização e interoperabilidade dos dados, crucial para empresas que usam diferentes sistemas e plataformas, devido à ausência de normas estabelecidas dificultam a partilha e a integração da informação entre os diversos atores envolvidos no processo (Shennib & Schmitt, 2021). Estas limitações diminuem o potencial transformador de IA nos processos e impedem a criação de modelos mais completos e capazes de captar a complexidade dos sistemas reais, o que é fundamental no âmbito da transição para práticas mais sustentáveis.

Para superar estas limitações, é essencial o desenvolvimento de infraestruturas digitais capazes de garantir a compatibilidade entre sistemas e promover a abertura e o uso responsável dos dados. A criação de ecossistemas colaborativos, suportados por normas claras de interoperabilidade e segurança, pode viabilizar a recolha e tratamento de dados em grande escala e ajudar a desbloquear o verdadeiro potencial da IA nas empresas, no contexto da economia circular (Petrik & Härer, 2024).

### **2.7.3 Ética**

A introdução da IA nos domínios empresarial e social, inclusive no contexto da economia circular, levanta um conjunto de preocupações éticas que não podem ser ignoradas. Uma das preocupações centrais aborda a falta de transparência dos sistemas de IA, devido a muitos dos algoritmos operarem de forma opaca, sendo até mesmo apelidados de “caixas negras” já que existe uma certa dificuldade em entender os processos internos que conduzem e geram os resultados (Berbenni-Rehm, 2023). Esta falta de compreensão do que acontece de facto causa uma diminuição na confiança sobre estes sistemas e dificuldade na responsabilização por erros ou resultados indesejados.

Neste âmbito, torna-se imprescindível promover abordagens que integrem a ética desde a conceção ao produto, juntamente com a IA, é preciso incorporar os princípios éticos e os valores humanos já desde a fase de desenho e desenvolvimento dos sistemas de IA (Berbenni-Rehm, 2023). Uma abordagem preventiva para estes aspetos permite antecipar possíveis problemas éticos, mas principalmente modelar o sistema de forma a garantir a sua transparência, equidade, privacidade e inclusão. Em vez de tratar a ética como um pós-pensamento à implementação, a sua introdução desde a primeira fase de desenvolvimento é uma precaução para um comportamento mais justo e sustentável (Berbenni-Rehm, 2023).

Paralelamente ao desenvolvimento de IA, outras questões éticas sobre a gestão de conhecimento surgem. Os grandes volumes de dados, a fragmentação da informação e a consequente dificuldade de distinção entre aquilo que é relevante e aquilo que não é, comprometem a eficácia dos sistemas de IA e o desenvolvimento de conhecimento coerente (Berbenni-Rehm, 2023). Reforçado pelo uso irresponsável e descomprometido de IA que pode ampliar estes problemas ao criar preconceitos nos dados e vieses que não contribuam para um bem coletivo.

### **2.7.4 Custos**

Outro desafio enfrentado, principalmente em fases iniciais da adoção de sistemas e tecnologias baseadas em IA são os custos associados. A necessidade de infraestruturas tecnológicas, plataformas de dados, software e outros componentes, mesmo antes de considerar o uso de IA, acaba por tornar-se uma barreira à sua implementação nas empresas. Estes custos não se restringem apenas à aquisição de tecnologia, mas também abrangem os investimentos necessários à qualificação ou contratação de pessoal, à integração com os sistemas da empresa, armazenamento de dados, manutenção contínua dos sistemas, entre outros.

Diversos estudos identificam os altos custos iniciais destas tecnologias como um dos principais desafios a enfrentar, principalmente em pequenas e médias empresas (PMEs). Empresas de menor porte enfrentam dificuldades em termos financeiros no que toca a integrar tecnologias como sensores inteligentes, sistemas de computer vision e algoritmos de ML, e sua implementação é, por muitas vezes, incompatível com os seus orçamentos operacionais (Rehman,2024). Além disso, a aquisição da tecnologia necessária como sensores, câmaras de alta resolução, robôs e/ou componentes robóticas e algoritmos customizados requerem também investimentos significativos, que podem estar fora do alcance das empresas (Sigüenza Tamayo et al., 2023).

A falta de incentivos públicos e financiamento especializado é outro aspeto que fazem os custos associados serem um desafio tão grande para as empresas que querem ter um modelo de negócio mais sustentável graças ao uso de IA (Sankaran, 2019). Outro aspeto, é os custos de manutenção, como a necessidade de atualização de softwares para manter a sua eficiência, o consumo energético e o treinamento de dados adaptados para ambientes específicos em contextos onde eles se encontram não padronizados (Agrawal et al., 2021).

Este é um desafio presente em múltiplas fases e que ultrapassa a simples compra de tecnologia. Embora IA represente um vetor transformador para a viabilização dos modelos no contexto da economia circular, os custos associados à sua implementação continuam a constituir um desafio significativa, sobretudo em contextos de baixa maturidade digital. Os investimentos necessários em infraestrutura tecnológica, desenvolvimento de algoritmos, aquisição de sensores e formação de competências especializadas impõem entraves à sua adoção ampla, especialmente entre PMEs e em países em desenvolvimento. Esses desafios econômicos podem comprometer não apenas a eficiência das soluções baseadas em IA, mas também aprofundar as assimetrias no acesso à inovação.

### 2.7.5 Falta de competências

A escassez em termos de competências técnicas e estratégicas no que toca à utilização de IA nas empresas acaba por se tornar outro dos principais desafios a enfrentar na sua adoção neste contexto de forma eficiente, podendo impactar diversas empresas de forma transversal.

De um modo geral, a falta destas competências em lidar com IA pode afetar diversos domínios de uma empresa, como o técnico ou o estratégico, por isso, a formação técnica e o conhecimento que os funcionários de uma empresa possuem são fatores determinantes e que possuem bastante peso na decisão da utilização de IA (Ronaghi, 2023). Apesar de ser possível recorrer a fontes externas para ultrapassar esta lacuna, não é boa ideia para uma empresa ficar dependente de fornecedores extremos, pois isto afeta a sua autonomia (Ronaghi, 2023).

Esta limitação torna-se ainda mais evidente e problemática em contextos de PME's que geralmente não possuem a capacidade técnica que estas tecnologias exigem. A falta de alfabetização digital e do acesso a formação qualificada contribuem para uma maior desigualdade nesta transição nas empresas. Neste sentido, destaca a necessidade de políticas, programas e incentivos de requalificação de profissionais, que promovam a sua capacitação digital adaptada às novas exigências (Roberts et al., 2024). E, obviamente, tecnologias mais recente e complexas como *Digital Twins* (Graessler et al., 2025) ou GenAI, exigem uma capacidade técnica maior.

A falta de competências no uso de IA torna-se assim uma barreira estrutural persistente e limitadora no que toca à difusão e efetividade de IA nas empresas. A sua superação exige esforços coordenados entre os diversos atores presentes no ciclo empresarial, mas são necessários, pois irão influenciar o quão efetivas serão estas novas tecnologias nas mãos da empresa.

## **CAPÍTULO III – ABORDAGEM METODOLÓGICA**

---

### **3.1 Contexto de investigação**

O principal objetivo das etapas da investigação é ser capaz de responder às perguntas que foram identificadas, independentemente dos procedimentos selecionados para tal. Cada investigação será conduzida de maneira diferente, terá objetivos e propósitos diferentes, mas toda a investigação segue um caminho com o intuito final de obter resultados. Algumas pessoas definem investigação como um movimento, uma transição do conhecido para o desconhecido (Kothari, 2004). Em suma, segundo Kothari (2004) o termo investigação pode ser definido como um método sistemático constituído pelas seguintes etapas: enunciação do problema, formulação de hipóteses, recolha dos dados, análise desses dados e por fim a elaboração de conclusões

A investigação aqui realizada insere-se no contexto da crescente necessidade de transição das empresas para modelos de negócio mais sustentáveis, em especial no quadro da economia circular, aliada à crescente digitalização dos processos empresariais através do uso de tecnologias emergentes, nomeadamente a IA. Este cenário é marcado por desafios ambientais, sociais e económicos que exigem soluções inovadoras e integradas.

Com a digitalização a tornar-se a afetar transversalmente todos os setores de atividade nas empresas, estas enfrentam a necessidade e a urgência de integrar cada vez mais ferramentas digitais de forma a manterem competitivas. Neste sentido, IA tem demonstrado ser uma tecnologia disruptiva com enorme potencial para otimizar processos, melhorar a eficiência e apoiar decisões mais sustentáveis. Quando aplicada ao contexto da economia circular, a IA pode ser uma aliada poderosa na monitorização de ciclos de vida dos produtos, na triagem automatizada de resíduos, no design de produtos sustentáveis, entre outros.

Apesar do seu potencial, o uso de IA nas empresas, inclusive aqui em Portugal, ainda é algo relativamente recente e que ainda está a ser explorado, sendo necessário compreender de forma mais aprofundada como estas tecnologias estão a ser aplicadas, quais os seus reais usos e os principais desafios enfrentados na sua implementação. Deste modo, esta dissertação pretende contribuir para este debate, focando-se na interseção entre IA e economia circular no contexto empresarial, com especial atenção à forma como estas tecnologias estão a ser utilizadas para desenvolver e apoiar estratégias de negócio mais sustentáveis, focando-se na seguinte questão “De que forma a inteligência artificial pode apoiar as empresas na transição para a economia circular, quais são os principais

usos e tecnologias aplicados, e que desafios emergem na sua implementação?” que orienta os seguintes objetivos:

1. Identificar as principais tecnologias e os principais usos da IA no contexto da economia circular;
2. Identificar os desafios associados com o uso da IA no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular;
3. Analisar casos de empresas em Portugal que utilizam IA no contexto da economia circular.

### **3.2 Metodologia de investigação**

Um dos principais passos que irá ditar o caminho da investigação é a seleção da metodologia a utilizar. É importante que esta escolha seja realizada em função dos objetivos que se pretende atingir e os dados que se pretende recolher.

Baseando-se na questão e objetivos orientadores deste estudo, escolheu-se adotar uma metodologia de investigação qualitativa. Assim, será possível compreender em profundidade como a IA tem sido aplicada no contexto da economia circular nas empresas.

Esta investigação constou da realização de entrevistas semiestruturadas a colaboradores de empresas que atuam em Portugal e se encaixam no contexto desta investigação, seguindo um guião de perguntas baseadas nos resultados obtidos durante a revisão de literatura, de forma a identificar os principais elementos de cada categoria analítica de interesse (usos de IA, tecnologias de IA utilizadas e desafios relacionados com o uso de IA). Este formato possibilita perguntas e seguimento de tópicos emergentes, capturando conhecimento, práticas operacionais e julgamentos profissionais que dificilmente seriam obtidos com outro tipo de inquéritos.

As entrevistas foram seguidas de uma análise temática das mesmas, análise esta adequada para organizar dados qualitativos em torno de tópicos (temas) permitindo sistematizar os usos, tecnologias e desafios identificados, visando assim assegurar uma triangulação metodológica e consequentemente uma maior validação dos resultados obtidos.

A escolha desta abordagem alinha-se com a necessidade de captar os significados, as práticas e as interpretações atribuídas pelos participantes ao fenómeno estudado ao explorar contextos reais e valorizar as perspetivas dos participantes perante estes contextos.

### **3.3 Entrevista Semiestruturada**

Para obter perspetivas aprofundadas sobre a aplicação da IA no contexto da economia circular, foram realizadas entrevistas semiestruturadas. Esta escolha metodológica baseia-se nos princípios descritos por McIntosh e Morse (2015), que posicionam a entrevista semiestruturada como uma estratégia de recolha de dados versátil, adequada a diferentes tradições filosóficas e eficaz tanto em estudos qualitativos como em abordagens mistas.

As entrevistas semiestruturadas foram escolhidas por permitirem um equilíbrio entre estrutura e flexibilidade. Segundo os autores, este tipo de entrevista parte de um guião previamente definido – com perguntas abertas e sequenciais – mas permite que o entrevistador adapte o rumo da entrevista com base nas respostas do participante, através de *probes* (perguntas sequenciais que seguem a anterior). Este formato é particularmente útil quando existe conhecimento prévio sobre o tema (por exemplo, após a revisão de literatura), mas se pretende explorar uma dimensão mais subjetiva relativa à experiência dos participantes, que dificilmente poderia ser captada por instrumentos totalmente estruturados.

Neste estudo, as entrevistas semiestruturadas foram usadas com um propósito descritivo/interpretativo, de acordo com a tipologia apresentada por McIntosh e Morse (2015). O objetivo das entrevistas é captar a experiência e a perceção dos entrevistados sobre o uso da IA em práticas circulares nas empresas. Esta abordagem beneficia do conhecimento dos participantes como fonte de compreensão e descoberta, permitindo a expansão dos quadros teóricos já existentes ou mesmo a identificação de novos aspetos relevantes.

#### **3.3.1 Técnica de amostragem**

Ao contrário de outros tipos de investigação onde existe uma maior ênfase à amostragem probabilística (*probability sampling*), no caso de investigações qualitativas é frequente o uso de uma amostragem intencional (*purposive sampling*), uma forma de amostragem não probabilística e que envolve uma seleção estratégica por parte do investigador de

unidades ou casos ricos em informação relevante para o contexto da investigação (Clark et al., 2021). O nome “intencional” surge justamente pela implicação de escolher casos com base em razões específicas. Os objetivos estabelecidos da investigação acabam por ser o guia que ajuda a escolher os casos que possivelmente irão ser mais ricos em termos de informação que podem fornecer.

As empresas que foram selecionadas para a realização das entrevistas semiestruturadas tiveram como base a sua relevância temática, a sua reputação em Portugal e a disponibilidade para participação neste estudo. Procurou-se incluir empresas preocupadas a sustentabilidade, que aplicassem práticas da economia circular e que, de alguma forma, tivessem contacto com tecnologias de IA. Esta escolha de diferentes empresas permite cobrir diferentes dimensões da aplicação da IA neste contexto, de forma a refletir realidades organizacionais distintas em relação ao nível de maturidade digital, recursos disponíveis e práticas circulares implementadas. Com esta abordagem procura-se maximizar a utilidade comparativa dos dados recolhidos durante a revisão de literatura e entender o seu nível de validação perante casos concretos em Portugal. Os critérios de seleção incluíram:

- Presença e atividade em território português;
- Integração de práticas de economia circular no modelo de negócio;
- Experiência com tecnologias de IA aplicadas a processos relacionados com a sustentabilidade e economia circular;
- Disponibilidade e interesse em colaborar neste tipo de estudos.

A identificação das empresas envolveu pesquisa documental a sites institucionais, relatórios de sustentabilidade e relatórios anuais publicados pelas empresas e o contacto foi efetuado através de redes profissionais e académicas. Após o contacto inicial por email, foi obtido o consentimento para participação numa entrevista.

Conforme os critérios demonstrados, a amostra total final contou com três empresas distintas: Amorim Cork Solutions, Lipor e Valorsul. A diversidade nos setores de atuação destas empresas permitiu captar diferentes perspetivas e práticas.

As entrevistas foram realizadas por videoconferência utilizando o Microsoft Teams a colaboradores das empresas selecionadas. Foram conduzidas de acordo com os princípios éticos da investigação científica, garantindo anonimato, consentimento informado e liberdade de resposta. Este formato semiestruturado permitiu uma condução mais flexível

das entrevistas, com possibilidade de explorar aspetos que emergiam durante esta interação.

Durante as entrevistas, foram aplicadas boas práticas conforme sugeridas por Clark et al. (2021): criação de um bom ambiente confiável, uso de linguagem clara, escuta ativa e a utilização de *probes* quando possível de forma a explorar as respostas dos participantes.

Esta abordagem possibilitou a recolha de dados ricos e contextualizados, que permitiram aprofundar a compreensão sobre o tema desta dissertação.

### **3.3.2 Elaboração do guião**

Numa entrevista semiestruturada, o investigador possui uma lista de perguntas a fazer, frequentemente designada de guião; é importante que estas perguntas sejam formuladas de uma forma aberta que encoraje o entrevistado a articular e pormenorizar as suas respostas (Clark et al., 2021). Apesar da existência de um guião, as perguntas não têm de ser feitas exatamente da forma como estão descritas nem sequer pela ordem estabelecida, visto que pode haver casos em que o entrevistado pode antecipar alguns perguntas durante a sua resposta. Contudo, apesar de uma certa liberdade que existe durante a realização das entrevistas, o guião continua a ser uma peça fundamental para garantir a coerência e comparabilidade entre as diferentes entrevistas realizadas (Clark et al., 2021).

É fundamental que as perguntas sejam elaboradas de forma a obter as perspetivas dos participantes perante o contexto da investigação, daí a importância da flexibilidade presente nas entrevistas semiestruturadas, no entanto é igualmente fundamental que as perguntas sejam significativas no contexto da investigação, o que implica a existência de um certo equilíbrio. Clark et al. (2021) aponta alguns pontos a considerar neste processo de elaboração:

- Criar uma certa ordem das perguntas em função das dimensões a analisar, de forma que estas fluam, mas ao mesmo tempo estar preparado para possíveis alterações na ordem durante a entrevista;
- Formular as perguntas ou tópicos da entrevista de forma a ajudar a responder às perguntas da investigação;
- Utilizar uma linguagem compreensível e relevante para os entrevistados;
- Evitar perguntas “orientadoras”, perguntas que levam a determinadas forma de resposta;

O guião da entrevista foi elaborado levando em consideração estes pontos e a sua ordenação lógica baseada nos objetivos previamente definidos. Estes objetivos, juntamente com a revisão de literatura efetuada, serviram como base e foram desdobrados em três domínios de análise, de forma a assegurar a coerência entre os dados recolhidos e o propósito da investigação, nomeadamente:

1. Usos da IA no contexto da Economia Circular;
2. Tecnologias de IA específicas aplicadas;
3. Desafios enfrentados relacionados com IA.

A correspondência entre os objetivos deste estudo e as secções do guião pode ser sintetizada da seguinte forma:

<b>Objetivo de Investigação</b>	<b>Dimensões de análise</b>	<b>Secções / Perguntas do Guião</b>
Identificar as principais tecnologias e os principais usos da IA no contexto da economia circular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnologias usadas: ML, DL, NLP, computer vision, sensores inteligentes, GenAI</li> <li>• Usos: triagem, design de produtos, otimização de processos, desenvolvimento de modelos de negócio, definição de KPIs</li> </ul>	P2, P3, P4, P5, P7, P8
Identificar os desafios associados com o uso da IA no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos de implementação</li> <li>• Qualidade e segurança dos dados</li> <li>• Falta de competências</li> <li>• Ética e transparência</li> <li>• Integração com sistemas existentes</li> </ul>	P9, P10, P11

<b>Objetivo de Investigação</b>	<b>Dimensões de análise</b>	<b>Secções / Perguntas do Guião</b>
Analisar casos de empresas em Portugal que utilizam IA no contexto da economia circular.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Casos práticos</li> <li>• Impacto causado</li> <li>• Integração com o modelo de negócio circular</li> <li>• Contexto nacional</li> </ul>	P1, P4, P5, P6, P7, P11, P12

**Tabela 4-** Relação entre os objetivos de investigação e o guião da entrevista

A estrutura das perguntas utilizada e o seu propósito individual foi o seguinte:

1. Há quanto tempo a empresa utiliza IA?
  - Perceber se é algo recente ou não e compreender o nível de maturidade da empresa relativamente ao uso de IA;
2. Que tipo de tecnologias de IA a empresa utiliza (ML, DL, NLP, etc.)?
  - Identificar as tecnologias utilizadas e perceber se estão de acordo com os resultados obtidos na revisão de literatura;
3. Para quais finalidades a IA tem sido mais utilizada dentro da empresa?
  - Identificar os principais usos de IA e perceber se estão de acordo com os resultados obtidos na revisão de literatura;
4. IA tem impactado de alguma maneira a eficiência dos processos dentro da empresa?
  - Avaliar possíveis impactos que o uso de IA tenha causado nas operações realizadas pela empresa;
5. Algum uso que se destaque pelo impacto que a IA causou?
  - Identificar caso(s) prático(s) de sucesso relativamente ao uso de IA;
6. Como os conceitos de economia circular se inserem no modelo de negócio da empresa?
  - Entender quais princípios de economia circular são aplicados e de que forma estes moldam o modelo de negócio da empresa;
7. Em que medida a IA tem ajudado na implementação de princípios da economia circular na empresa?
  - Identificar usos de IA dentro do contexto da economia circular e perceber se estão de acordo com os resultados obtidos na revisão de literatura;

8. Que benefícios identifica no uso de IA neste contexto?
  - Perceber os principais benefícios da integração de IA com os conceitos de economia circular;
9. Que tipo de problemas conseguiu identificar associados à implementação e uso de IA na empresa?
  - Identificar os principais desafios enfrentados pela empresa relativamente ao uso de IA circular e perceber se estão de acordo com os resultados obtidos na revisão de literatura;
10. Como lidou com [problema] ?
  - Perceber que estratégias foram utilizadas para ultrapassar tais desafios;
11. Considera IA algo acessível para as empresas atualmente?
  - Identificar outros possíveis desafios associados com a implementação de IA;
12. Como vê o futuro de IA aplicada ao contexto empresarial?
  - Obter uma opinião do entrevistado relativamente ao futuro de IA em contexto empresarial.

### **3.4 Análise Temática**

A análise dos dados qualitativos recolhidos no âmbito deste estudo baseou-se na análise temática, um método com uma crescente popularidade devido à sua transparência teórica e metodológica e à sua sensibilidade às propriedades dos dados e aos temas que são escolhidos (Clark et al., 2021). Este método revela-se particularmente adequado ao carácter exploratório do estudo e ao objetivo de identificar padrões relacionados com o uso de IA no contexto da economia circular.

A utilização da análise temática justifica-se pela sua flexibilidade e adequação ao carácter exploratório deste estudo, ao permitir a identificação e interpretação de padrões com significado nos dados recolhidos (Braun & Clarke, 2021; Clark et al., 2021). Diferente de outras abordagens qualitativas, como a *grounded theory* ou a análise de conteúdo, a análise temática mostrou-se mais apropriada por não exigir a construção de uma teoria formal, mas sim a sistematização e compreensão dos temas emergentes das entrevistas, alinhando-se aos objetivos da investigação.

Esta análise baseia-se em seis etapas, conforme descritas por Braun e Clarke (2021):

- **Familiarização:** Esta etapa tem como objetivo criar uma familiaridade com os dados obtidos. Durante esta etapa foram lidas e relidas as transcrições e anotações feitas relativamente às entrevistas realizadas de forma a absorver o conteúdo e obter uma visão geral dos dados obtidos;
- **Codificação:** Nesta etapa identifica-se segmentos de dados que parecem potencialmente interessantes, significativos ou relevantes para as questões de investigação e atribui-se-lhes “códigos” que são pequenas descrições significativas. Esta codificação pode ser mais orientada para os dados (*data-driven*) ou para a teoria (*theory-driven*), mas uma não exclui a outra, visto que a codificação é mais um espectro do que uma dicotomia. No caso desta investigação, esta codificação inicial envolveu a identificação de informação ligada aos usos e tecnologias de IA e aos desafios associados;
- **Geração de temas iniciais:** Tem como objetivo identificar padrões no conjunto de dados, compilando grupos de códigos que parecem partilhar uma ideia ou conceito central. Códigos normalmente contêm um significado mais específico, temas apresentam algo mais amplo. Neste caso os códigos anteriormente identificados foram agrupados em torno de ideias centrais como “usos da IA”, “tecnologias” e “desafios”;
- **Desenvolvimento e revisão de temas:** Verificação do sentido dos temas perante os códigos extraídos e o conjunto de dados como um todo. Os temas têm de destacar os padrões mais importantes presentes nos dados. Esta fase decide se os temas serão mantidos ou não. Os agrupamentos iniciais foram comparados com os dados obtidos, efetuando ajustes de forma a refletir o seu conteúdo;
- **Definição e nomeação de temas:** Afinamento da análise de forma a assegurar que cada tema está claramente demarcado em torno de um conceito central de forma a refletir o conteúdo. Nesta fase foram definidos os temas considerados finais do conjunto de dados obtidos (Tabela 5);
- **Escrita:** Tal como para muitas outras abordagens qualitativas, a escrita é uma frase integral do processo analítico. Ao escrever o objetivo será juntar esta perspetiva analítica com os dados extraídos de forma a contar uma “história” coerente sobre o conjunto de dados que incide sobre a investigação. Esta fase implicou articular os temas definidos junto com os dados obtidos e a literatura de

suporte com o objetivo de apresentar uma narrativa clara e sustentada sobre o tema deste trabalho;

Estas fases pretendem demonstrar uma ideia aproximada dos principais elementos de uma análise temática e de como estes se interligam, no entanto, apesar de apresentarem uma ordem lógica, elas não seguem necessariamente uma sequência rigorosa, pois na análise de dados qualitativos existe uma interação constante entre a conceptualização e a revisão dos dados (Clark et al., 2021). É um processo dinâmico e não linear.

Na prática, a aplicação deste método seguiu as etapas mencionadas anteriormente adaptando-as ao contexto desta investigação. As informações recolhidas durante as entrevistas foram analisadas de forma a criar esta familiarização com os dados. A codificação foi realizada com base nos dados recolhidos, com sensibilidade para as dimensões identificadas durante a revisão de literatura (usos da IA, tecnologias, desafios) de forma a integrar estes aspetos. A codificação e a sua organização inicial foram feitas manualmente de forma a garantir o seu rigor e permitir a sua revisão.

Os temas acabam por servir como agregadores dos códigos gerados anteriormente (Tabela 5) e demonstram ser essenciais para responder aos objetivos do estudo: Identificar os principais usos e tecnologias de IA no contexto da economia circular; Identificar os desafios associados e analisar casos práticos dentro deste contexto.

A análise temática foi conduzida de forma reflexiva, reconhecendo o papel ativo por parte do investigador na construção e interpretação dos temas. Embora tenha sido aplicada com o maior rigor possível, admite-se que a subjetividade inerente a este tipo de análise possa ter influenciado a definição e agregação dos temas, o que foi mitigado através da constante revisão crítica e do cruzamento com a literatura e os dados recolhidos.

<b>Temas</b>	<b>Códigos associados</b>
Usos de IA no apoio à economia circular	<ul style="list-style-type: none"><li>• Triagem de resíduos</li><li>• Reaproveitamento de materiais</li><li>• Análise de dados</li><li>• Otimização de processos</li><li>• Manutenção preditiva</li></ul>

Temas	Códigos associados
Tecnologias de IA aplicadas nas empresas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Machine learning</li> <li>• Computer vision</li> <li>• Sensores inteligentes</li> </ul>
Desafios na implementação de IA nas empresas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investimento inicial</li> <li>• Adaptação das tecnologias ao contexto</li> <li>• Segurança da informação</li> <li>• Preocupações éticas</li> <li>• Falta de competências técnicas</li> </ul>
Impactos nas empresas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do desperdício</li> <li>• Maior eficiência dos processos</li> <li>• Maior produtividade</li> <li>• Melhor serviço prestado</li> </ul>

**Tabela 5-** Temas de análise e códigos associados

### 3.5 Caracterização da amostra

A amostra deste estudo qualitativo consistiu em três empresas selecionadas com recurso a uma técnica de amostragem intencional explicada anteriormente, atendendo aos diferentes critérios, sendo as empresas as seguintes:

- **Amorim Cork Solutions:** empresa pertencente ao Grupo Amorim, especializada na produção e aproveitamento de cortiça. Dedicar-se ao desenvolvimento de soluções com base em cortiça natural, com destaque para a produção de rolhas. Com uma longa tradição no reaproveitamento de resíduos internos, a empresa tem vindo a adotar práticas de economia circular já há bastante tempo. Nos últimos anos, intensificou o investimento em inovação tecnológica e IA, aplicando estas ferramentas principalmente no controlo de qualidade, triagem automatizada e reaproveitamento de matéria-prima. A empresa combina um forte pilar ambiental com uma abordagem centrada na valorização económica dos resíduos, refletindo um perfil industrial de grande dimensão e elevado grau de especialização. O

entrevistado desta empresa desempenha funções como responsável pelos projetos de Economia Circular, estando diretamente envolvido no desenvolvimento e implementação de iniciativas ligadas à valorização de resíduos e integração de novas soluções tecnológicas no processo produtivo;

- **Lipor:** empresa responsável pela gestão e tratamento de resíduos urbanos da região do Grande Porto. Apresenta um forte compromisso com a sustentabilidade, com práticas alinhadas com os princípios da economia circular e um investimento crescente em soluções digitais e de IA, sobretudo na triagem e otimização de processos. Procura otimizar os seus processos de recolha, triagem e comunicação, tirando partido das potencialidades da IA para melhorar o serviço prestado à população e aumentar a eficiência na gestão dos resíduos. A sua abordagem híbrida, que combina desenvolvimento interno com parcerias académicas, reflete uma lógica de adaptação tecnológica gradual e estratégica. Neste caso a entrevista contou com dois membros, o diretor do Departamento de Planeamento e Gestão de Sistemas de Informação, responsável por áreas como controlo de gestão, informática, provisionamento, finanças e recursos humanos e o responsável da Unidade de Sistemas de Informação, que abrange infraestruturas, desenvolvimento de software, segurança da informação e *analytics*;
- **Valorsul:** empresa que atua na região de Lisboa e Oeste no tratamento de resíduos urbanos. Apresenta um perfil com uma boa maturidade digital, com investimentos consistentes em tecnologias emergentes e uma forte aposta na automatização dos processos. Recorre à IA em diversas etapas da cadeia de valor dos resíduos, desde a triagem e separação até à análise preditiva. A empresa trabalha com parceiros nacionais e internacionais para testar e implementar ferramentas como NILG.AI, WasteAnt, GreyParrot e RecycleEye, ilustrando uma visão integrada da inovação tecnológica como motor de transformação da eficiência e sustentabilidade operacional. A cultura organizacional promove uma visão moderna e adaptativa, onde a IA é percebida como um fator central para a modernização do setor e o reforço da circularidade. O representante da Valorsul entrevistado desempenha funções na área da inovação e gestão tecnológica, com experiência na coordenação de projetos ligados à modernização de processos de triagem e recuperação de resíduos.

Os entrevistados e representantes das empresas em questão ocupavam cargos de responsabilidade na gestão, planejamento estratégico e/ou área de sistemas de informação e tecnologia onde atuam e estão diretamente envolvidos na implementação e/ou supervisão de soluções tecnológicas nas respectivas empresas, combinando conhecimento técnico e visão estratégica, fatores essenciais para compreender as potencialidades e limitações da aplicação da IA nas práticas empresariais, fornecendo assim uma visão abrangente e relevante sobre o uso de IA nas respectivas empresas.

Em comum, as três empresas entrevistadas têm uma forte presença no território nacional nos seus respectivos setores de atividade e operam com uma certa maturidade digital que permite mapear práticas robustas de integração de IA no contexto da investigação.

## **CAPÍTULO IV – APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS**

---

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante a investigação, organizados de forma a esclarecer os objetivos definidos e as perguntas de investigação delineadas no início deste trabalho. A análise dos dados recolhidos, realizada através de análise temática, permitiu identificar padrões e categorias que fornecem respostas às questões orientadoras, relativas ao uso da IA no contexto da economia circular. Os dados provêm de três entrevistas semiestruturadas realizadas com representantes da Lipor, Amorim Cork Solutions e Valorsul, empresas de relevo no domínio da sustentabilidade e inovação tecnológica em Portugal.

A apresentação dos resultados estrutura-se em torno dos objetivos da investigação e dos temas definidos previamente.

#### **4.1 Usos de IA no apoio à economia circular**

Os resultados obtidos através das entrevistas permitiram evidenciar um conjunto alargado de aplicações concretas. Os dados recolhidos demonstram que a IA está a ser utilizada pelas empresas entrevistadas para dar suporte à sua atividade, alinhando-se com os princípios da economia circular e com os padrões apontados pela literatura científica.

Durante as entrevistas, foi sido apresentado um conjunto diversificado de soluções baseadas em IA que ilustram a integração tecnológica ao longo de toda a cadeia de valor do tratamento de resíduos, refletindo um elevado grau de maturidade digital das empresas em questão. Demonstraram que a aplicação da IA não se limita a uma fase específica de um processo, mas estende-se desde a fase de planeamento estratégico até à valorização e recuperação de materiais. Um exemplo disso é, no caso da Valorsul, a utilização de ferramentas de apoio à decisão como a NILG.AI, que tem sido aplicada para otimizar a localização de ecopontos, resultando em melhorias significativas tanto na eficiência da resposta municipal como na aceitação das propostas submetidas, complementarmente, a plataforma “360 Waste” tem permitido uma gestão dinâmica das rotas de recolha, apoiando-se na sensorização dos ecopontos para otimizar em tempo real os circuitos logísticos. Esta lógica de otimização estende-se à valorização energética, onde ferramentas como a “WasteAnt” recorrem à IA para ajustar parâmetros críticos e maximizar a performance do processo.

##### **Triagem de resíduos**

Em termos de usos, a IA tem vindo a ser aplicada com destaque em processos de triagem automática. Esta funcionalidade surge evidenciada nas três empresas analisadas, ainda que com diferentes tecnologias e objetivos. No caso da Amorim Cork Solutions, o entrevistado indica a existência de robôs alimentados por IA, utilizados na triagem de rolhas com base em critérios definidos por modelos treinados através de machine learning e computer vision de forma a separar as defeituosas das outras. Esta aplicação tem como objetivo principal reduzir o desperdício ao identificar de uma forma mais precisa quais os produtos que devem ser reaproveitados e quais os que devem ser rejeitados, contribuindo assim para um uso mais eficiente da matéria-prima natural por parte da empresa.

Por sua vez, nos outros dois casos, por se tratarem de empresas que atuam na área do tratamento de resíduos, fazem uso de IA na triagem automatizada de resíduos através de integração de tecnologias alimentadas por IA capazes de reconhecer diversos tipos de materiais.

### **Reaproveitamento de materiais**

O reaproveitamento de materiais constitui uma das finalidades centrais da economia circular, e as entrevistas realizadas revelaram que a IA tem desempenhado um papel estratégico na melhoria e expansão dessas práticas. O foco não está apenas na separação eficiente dos resíduos, mas também na capacidade de as empresas identificarem oportunidades de reaproveitamento e reintroduzirem materiais nos seus ciclos produtivos ou comerciais.

A Lipor apresenta um exemplo desta abordagem ao recorrer aos dados recolhidos relativos à produção de resíduos. Estes dados alimentam modelos que orientam decisões sobre como e onde atuar para melhorar a qualidade e o reaproveitamento dos materiais recebidos. Este conhecimento permite, por exemplo, antecipar os tipos de materiais a serem recebidos e adaptar os processos industriais em função disso, otimizando o fluxo de resíduos para aproveitamento máximo. A Lipor tem ainda planos para evoluir na cadeia de valor, como afirma um dos entrevistados: “nós queremos fechar o ciclo, aqui estamos a potenciar verdadeiramente a economia circular [...], realmente há ali valor naqueles resíduos.”.

O reaproveitamento de materiais também é reforçado pelas soluções específicas apresentadas durante a entrevista com a Valorsul, como o projeto denominado

“iBot4CRMs” que recorre a IA juntamente com a robótica para identificar e recuperar matérias-primas críticas. Esta solução insere-se numa lógica mais avançada de reaproveitamento, focada na recuperação de materiais com elevado valor económico e estratégico.

A Amorim Cork Solutions, embora centrada num produto natural, aplica a IA como forma de preservar e valorizar ao máximo a cortiça utilizada. O reaproveitamento das sobras do processo produtivo e, segundo o entrevistado, a incorporação de resíduos de outras empresas desde 2017 revelam um compromisso com a valorização total da matéria-prima disponível. Embora a triagem automatizada seja uma etapa importante, os ganhos em termos de reaproveitamento resultam também da capacidade de detetar defeitos com maior precisão e assim reduzir descartes desnecessários, permitindo que existe um maior aproveitamento dos recursos e que a consistência do produto final seja mantida.

### **Análise de dados**

A análise de dados revelou-se também um dos principais aspetos da integração de IA nos modelos de negócio das empresas em questão. Referiram a capacidade de recolher e tratar sistematicamente grandes volumes de dados como uma prática que auxilia na otimização dos seus processos.

No caso da Lipor, os entrevistados destacaram o desenvolvimento interno de uma aplicação própria, iniciada em 2017, que permite monitorizar em tempo real a recolha de resíduos por ponto geográfico, detalhando até mesmo o tipo e a quantidade de resíduos produzidos,

Talvez a partir de 2017-2018 que nós desenvolvemos internamente uma aplicação que nos permite fazer, digamos, toda a gestão, toda a motorização da recolha de resíduos, ou seja, nós sabemos exatamente por ponto, por local de produção de resíduos, o tipo e as quantidades de resíduos que são produzidos

Criando assim uma base de dados mais robusta usada para ajustar os circuitos de recolhas dos camiões, para o planeamento de campanhas de sensibilização e para alimentar modelos que requerem este tipos de dados.

De forma semelhante, durante a entrevista com o representante da Valorsul, foi salientado que os dados que são recolhidos durante os processos de triagem e separação de materiais são usados para identificar oportunidades de melhoria e desenvolver campanhas de

comunicação mais completas e precisas , com base em dados concretos sobre a produção e a tipologia dos resíduos.

Estes exemplos demonstram que a IA, para além das aplicações mais visíveis na automação, é capaz de potenciar o valor dos dados empresariais, sendo instrumental para criar conhecimento a partir de informação dispersa e alimentar decisões que otimizam o ciclo de vida dos recursos.

### **Otimização de processos**

A IA tem igualmente sido aplicada à otimização de processos logísticos, especialmente na gestão da recolha e transporte de resíduos. Como no caso da Lipor descrito anteriormente onde a aplicação desenvolvida internamente permite ajustar de uma forma dinâmica os circuitos de recolha dos camiões.

No caso da Valorsul, está presente o uso da plataforma “360 Waste”, plataforma que recorre à sensorização dos ecopontos e a modelos de IA para criar rotas de recolha em tempo real, otimizando os trajetos e reduzindo o consumo de combustível e o impacto ambiental.

Estas aplicações representam um uso direto da IA na gestão adaptativa de recursos, promovendo ganhos em termos de eficiência, sustentabilidade e custos operacionais.

### **Manutenção preditiva**

Importa ainda referir o desenvolvimento de modelos locais de IA, não baseados em LLMs, que, no caso da Lipor, têm sido concebidos internamente ou em parceria com instituições académicas, visando funções específicas como a manutenção preditiva das linhas de triagem. A título ilustrativo, um dos entrevistados da Lipor referiu que a empresa está a desenvolver, com parceiros académicos, modelos locais de IA que recolhem e interpretam dados das linhas de triagem por meio de câmaras e sensores e que seriam capazes de antecipar falhas ou comportamentos anómalos dos equipamentos, com o objetivo de prolongar o tempo de vida útil das máquinas utilizadas, reduzindo os tempos de interrupção dos processos e evitando possíveis desperdícios associados a falhas técnicas.

<b>Uso identificado</b>	<b>Empresa que o mencionou</b>
Triagem de resíduos	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor

Reaproveitamento de materiais	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor
Análise de dados	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor
Otimização de processos	Valorsul; Lipor
Manutenção preditiva	Lipor

**Tabela 6-** Usos de IA identificados durante as entrevistas

## 4.2 Tecnologias de IA aplicadas nas empresas

No que respeita ao objetivo relativo à identificação das principais tecnologias de IA utilizadas no contexto da economia circular, os dados recolhidos confirmaram a adoção de diversas tecnologias já referidas na literatura.

### Machine Learning

Destaca-se o uso de ML, uma das tecnologias mais referenciadas durante as entrevistas, assumindo um papel central quando se fala na automatização dos processos.

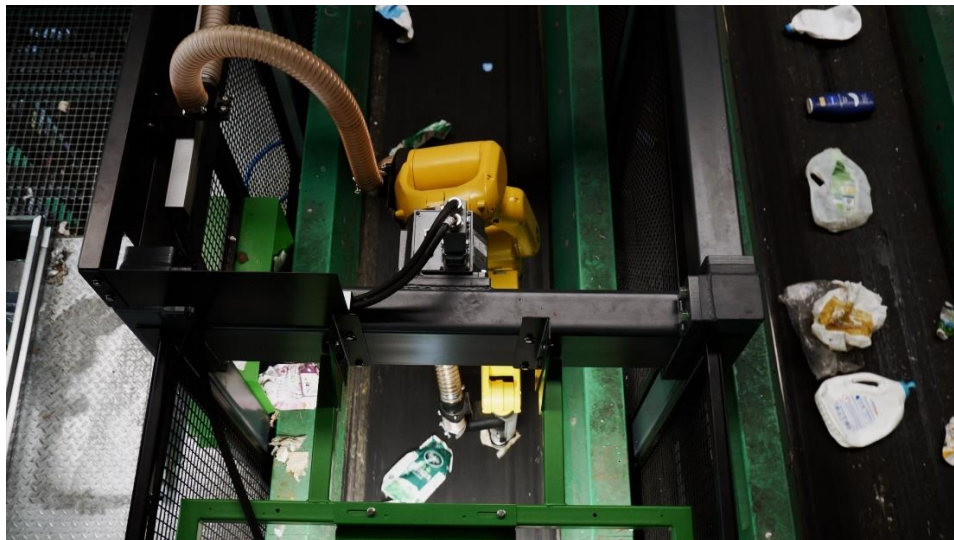
Na Amorim Cork Solutions, ML é aplicado no referido processo de triagem de rolhas, onde os algoritmos são treinados para distinguir, com elevado grau de precisão, rolhas em bom estado daquelas com defeitos. Tal como referido pelo entrevistado, a empresa está a explorar formas de melhorar os sensores existentes para “melhorar ainda mais a deteção de defeitos”. Esta aplicação permite reduzir significativamente o erro humano e melhorar a consistência do produto final, algo particularmente relevante numa indústria que trabalha com um material natural e heterogéneo como a cortiça. Segundo a empresa, o uso de ML tem permitido afinar os parâmetros de separação ao longo do tempo, numa lógica de aprendizagem adaptativa, com base em grandes volumes de dados recolhidos a partir da inspeção ótica de cada rolha. O sistema vai sendo reconfigurado consoante as novas variabilidades do material, permitindo uma maior eficácia no controlo de qualidade e menos desperdício.

Nos outros casos, ML é utilizado em diferentes momentos do processo, sobretudo na gestão e previsão de resíduos. Como explicado durante as entrevistas, os dados recolhidos nos circuitos de recolha e nas linhas de triagem são utilizados para treinar modelos capazes de identificar os diversos tipos de resíduos e as suas respetivas características.

A adoção desta tecnologia demonstra um grau de maturidade crescente no uso de dados para suportar decisões operacionais e estratégicas. Além disso, estas experiências corroboram as conclusões apontadas durante a revisão de literatura, que apontam o ML como um dos pilares da transformação digital no contexto da economia circular, permitindo aumentar a eficiência dos sistemas, reduzir perdas e apoiar a criação de valor a partir de fluxos de dados anteriormente subaproveitados.

### **Computer Vision**

A tecnologia de computer vision também foi mencionado pelas três empresas ao ser utilizada em processos de triagem automática. Esta tecnologia é fundamental quando se utiliza braços robóticos (Figura 4) pois permite ao sistema que os alimenta “ver” e separar automaticamente os materiais.



**Figura 4-** Robô “RecycleEye” de triagem da Valorsul

**Fonte:** Valorsul (2025) *Valorsul investe em robô de triagem com IA para tratar resíduos urbanos.*

Na Lipor e na Valorsul, computer vision é aplicada nas linhas de triagem automática, através de sensores óticos implementados ao longo da linha capazes de reconhecer diferentes tipos de materiais com base na sua composição e características visuais. Estes sistemas capturam imagens em alta resolução dos materiais à medida que percorrem as linhas e os algoritmos associam características visuais, como cor, forma e textura, a tipos específicos de resíduos. Através dessa identificação visual, é possível categorizar os

materiais com um nível de precisão muito superior ao das inspeções manuais, otimizando assim o processo de triagem.

As evidências recolhidas durante esta investigação apontam para uma clara valorização do potencial desta tecnologia, não apenas para substituir tarefas manuais, mas também para oferecer novos insights sobre os processos operacionais através de uma análise mais visual.

### **Sensores inteligentes**

Os sensores inteligentes, como mencionado, representam uma “ponte” entre o mundo físico e os sistemas digitais alimentados por IA. Estes sensores permitem a recolha contínua de dados ambientais e operacionais, os quais são posteriormente analisados por algoritmos para suportar decisões em tempo real ou de forma preditiva.

Na Valorsul, os sensores instalados nos ecopontos são parte integrante da plataforma *360 Waste*, que permite a monitorização destes em tempo real. Estes dados são integrados com algoritmos de IA que permitem uma gestão preditiva dos circuitos logísticos, reduzindo a ocorrência de contentores vazios a serem recolhidos ou de sobrecargas com risco ambiental. De acordo com o entrevistado, esta solução tem permitido uma redução relevante nas rotas redundantes e um melhor alinhamento com as necessidades reais dos cidadãos.

Na Lipor, sensores de enchimento são igualmente utilizados nas linhas de produção, nomeadamente nos contentores (bunkers) de resíduos, permitindo uma regulação precisa do processo de armazenamento. Estes sensores, associados a sistemas de IA, fornecem dados contínuos sobre o nível de enchimento, tempo médio de enchimento, temperatura e outros parâmetros operacionais. Como referiu um dos entrevistados da Lipor, a integração desta tecnologia permite antecipar pontos críticos no processo produtivo, como congestionamentos ou falhas no fluxo de resíduos, e acionar respostas automáticas ou ajustes manuais com base em dados atualizados em tempo real.

Para além da sua função de monitorização, os sensores inteligentes têm vindo a assumir um papel fundamental como geradores de dados de base para os sistemas de ML utilizados pelas empresas. O valor dos sensores reside não só na recolha de dados em tempo real, mas também na sua contribuição para o treino de modelos mais fiáveis e contextualmente ajustados às operações locais

<b>Tecnologia identificada</b>	<b>Empresa que a mencionou</b>
Machine learning	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor
Computer vision	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor
Sensores inteligentes	Valorsul; Lipor

**Tabela 7-**Tecnologias de IA identificadas durante as entrevistas

### **4.3 Desafios na implementação de IA nas empresas**

No que se refere ao segundo objetivo, centrado na identificação dos desafios associados ao uso da IA no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da economia circular, os entrevistados destacaram um conjunto de dificuldades que em muito convergem com o que foi identificado na revisão de literatura.

#### **Investimento inicial**

Os custos de implementação foram unanimemente apontados como um dos principais desafios, sendo que, por exemplo, a Amorim Cork Solutions referiu investimentos na ordem dos três a quatro milhões de euros em projetos que envolviam a implementação de tecnologias de IA na empresa, embora salientando o retorno significativo alcançado em poucos meses, refletindo o impacto direto da tecnologia na redução de desperdício e na melhoria da consistência do produto final.

Os entrevistados foram referindo o esforço e custos consideráveis em termos de recursos humanos, técnicos e financeiros necessários para desenvolver e/ou implementar este tipo de soluções e, reconhecem também que este tipo de financiamento num contexto empresarial pode ser muita vezes inacessível para empresas com menos capacidades financeiras.

#### **Adaptação das tecnologias ao contexto**

A necessidade de adaptação das tecnologias ao contexto específico de cada setor e processo foi igualmente mencionada, já que a aplicação da IA nestas empresas requer soluções ajustadas às particularidades das suas áreas de negócio.

Os entrevistados sublinham a necessidade que existe para qualquer tipo de solução que venha a ser implementada seja adaptada ao contexto da empresa e ao seu produto e/ou serviço que fornecem. Por exemplo, durante a entrevista com o representante da Amorim

Cork Solutions, foi referido que a cortiça é um material com características naturais bastante próprias e que, por isso, existe um cuidado para com as máquinas e afins que interagem diretamente com este material de forma a assegurar que este não seja prejudicado de alguma forma. De forma semelhante, os membros entrevistados da Lipor referiram que os sistemas têm afinações, “graus de liberdade” como foi referido pelos próprios, e que a configuração das máquinas, nomeadamente os separadores óticos, requer afinações técnicas constantes. Estes ajustes dependem do tipo de material que entra nas linhas e/ou dos objetivos de separação naquele momento, o que demonstra a elevada contextualização exigida para o bom funcionamento destas soluções.

### **Segurança da informação**

Foi possível perceber que a utilização de IA acresce ainda mais a preocupação com questões de segurança na utilização dos dados, estando os entrevistados particularmente atentos ao risco associado à partilha indevida de informação e à necessidade de assegurar a integridade dos dados utilizados nos modelos de IA.

Durante as entrevistas, os entrevistados foram demonstrando uma preocupação com a proteção dos dados que são utilizados nos sistemas de IA, sobretudo em contexto empresarial. Os representantes da Lipor chegaram a mencionar os e-mail que recebem da empresa com boas praticas e cuidados a ter em relação a não colocar dados pessoais e informação de negócio confidencial em plataformas externas como o *ChatGPT* e, mencionaram também a questão de utilizar plataformas que forneçam contratos com, e passo a citar, “cláusulas mais de proteção de privacidade”.

A questão da segurança, embora não tenha sido apontada como um bloqueio direto à adoção de IA, acaba por ser tratada como um pré-requisito indispensável para a sua implementação.

### **Preocupações éticas**

A emergência da IA em contextos empresariais tem trazido à tona importantes questões éticas, incidindo sobre temas como a transparência dos modelos, o enviesamento algorítmico e a utilização responsável dos dados. Este tipo de preocupação foi demonstrado durante as entrevistas realizadas, demonstrando uma consciência crítica sobre os riscos associados à adoção de tecnologias baseadas em IA.

Um dos pontos levantados durante as entrevistas refere-se à opacidade dos modelos generativos, como os LLMs, cuja complexidade e falta de explicabilidade suscitam dúvidas quanto à origem dos dados usados para treino destes modelos e à forma como são produzidas as respostas. Tal como um dos representantes entrevistados da Lipor referiu,

As questões éticas têm muito a ver com o treino dos modelos (...) aí temos matéria-prima para muita discussão, a forma como os modelos são treinados, de que forma é que as respostas são condicionadas pelo treino, de que forma é que são condicionadas por quem programou os modelos e pelas empresas

Esta incerteza em relação aos modelos utilizados é mencionada mesmo como um risco que pode afetar as decisões operacionais da empresa. Para além disso, o mesmo entrevistado destacou que a melhor forma de lidar com certas questões deste tipo passa por uma adotar postura mais preventiva e informada e tentar perceber quais são as melhores opções a seguir.

É possível constatar uma crescente sensibilidade generalizada para com as questões éticas, expressa, por exemplo, na valorização do papel humano nos processos de decisão e na recusa da IA como um substituto integral de funções humanas que envolvem julgamento, responsabilidade ou interação com o público. As empresas reconhecem que a IA requer não apenas uma integração técnica, mas também uma reflexão contínua sobre os seus impactos sociais e ambientais, o que reforça a necessidade de desenvolver uma “cultura ética” digital dentro das empresas.

### **Falta de competências técnicas**

Um outro desafio relevante prende-se com a capacitação das equipas. Esta limitação manifesta-se tanto ao nível da escassez de profissionais com formação especializada para lidar com IA, como na dificuldade de adaptação das equipas já existentes às exigências técnicas e cognitivas que estas tecnologias implicam. Os entrevistados mencionam que apesar de existirem membros especializados nas suas empresas, pelo menos em certas áreas, ainda existe uma certa preocupação com a capacitação digital de colaboradores atuais e futuros.

Os participantes enfatizaram a importância de investir na formação e desenvolvimento de competências internas, reconhecendo que a falta de conhecimento técnico pode limitar o

aproveitamento do potencial da IA. De forma a mitigar este problema as empresas acabam recorrer as terceiros, parcerias externas, parcerias como as descritas durante as entrevistas da Lipor e da Valorsul com universidades, centros de investigação e/ou outras empresas. Este tipo de colaborações tem permitido a cocriação de soluções adaptadas à realidade das empresas e o reforço das competências técnicas internas.

Além disso, em forma de exemplo, os membros entrevistados da Lipor sublinharam que a crescente acessibilidade das ferramentas de IA não elimina a necessidade de conhecimento técnico. Embora soluções como *Copilot* ou *ChatGPT* sejam intuitivas e utilizáveis mesmo por aqueles que não sejam especialistas, o verdadeiro valor estratégico da IA depende da capacidade das empresas em “fazer as perguntas certas” e interpretar criticamente os outputs gerados. Neste sentido, a capacitação não deve ser vista apenas como uma questão técnica, mas também como um processo formativo que envolve pensamento crítico, literacia digital e visão estratégica.

<b>Desafio identificado</b>	<b>Empresa que o mencionou</b>
Investimento inicial	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor
Adaptação das tecnologias ao contexto	Amorim Cork Solutions; Lipor
Segurança da informação	Valorsul; Lipor
Preocupações éticas	Lipor
Falta de competências técnicas	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor

**Tabela 8**-Desafios identificados durante as entrevistas

#### **4.4 Impactos nas empresas**

Os dados recolhidos evidenciam um cenário marcado pela crescente integração nas empresas da IA como ferramenta de apoio à implementação e reforço de práticas circulares. As empresas analisadas, embora com especificidades nos seus setores de atividade, revelaram um compromisso comum com a inovação tecnológica como elemento central das suas estratégias de sustentabilidade.

##### **Redução do desperdício**

Um dos impactos mais imediatos e tangíveis relatados pelas empresas entrevistadas prende-se com a significativa redução do desperdício, especialmente nos processos de

triagem e reaproveitamento de materiais. Os avanços proporcionados pela IA traduzem-se, segundo as empresas, numa separação mais precisa dos resíduos e consequentemente uma melhor taxa de reaproveitamento da matéria-prima utilizada, com impactos positivos tanto em termos ambientais como económicos. Os entrevistados referem que, após a implementação destas tecnologias, foi observada uma diferença clara na quantidade de resíduos reciclados, o que confirma a eficácia destas soluções na redução do desperdício e no aumento da eficiência dos processos de reciclagem.

Esta redução do desperdício não se limita apenas a um melhor aproveitamento de materiais, mas está intimamente ligada à capacidade da IA em atuar de forma preditiva e adaptativa. Os sistemas inteligentes implementados permitem que as decisões sejam baseadas em dados em tempo real, analisando padrões de produção e descarte, e ajustando processos de forma dinâmica para maximizar o reaproveitamento e minimizar perdas. Por exemplo, ao integrar sensores e algoritmos de ML, as empresas conseguem detetar com maior exatidão as características de cada resíduo, classificando-os com mais rigor e reduzindo o volume de materiais rejeitados indevidamente.

### **Maior eficiência dos processos**

A eficiência operacional foi outro dos impactos mencionado durante as três entrevistas, sendo esta melhoria frequentemente associada à automação, à capacidade de análise de dados e à integração de sistemas inteligentes. A Lipor constitui um exemplo desta tendência: ao desenvolver internamente uma plataforma digital para a gestão e monitorização da recolha de resíduos — alimentada por dados obtidos em tempo real — a empresa conseguiu não só otimizar os seus circuitos logísticos, como também melhorar a afinação das linhas de triagem em função da tipologia dos resíduos recolhidos.

A eficiência também se manifesta na gestão preditiva dos ativos, particularmente nas unidades de triagem, que contam com modelos para manutenção preditiva que ao prever possíveis falhas reduz o tempo de inatividade e otimiza o fluxo de trabalho.

Além disso, nas empresas que atuam na gestão de resíduos foi mencionado pelos entrevistados a gestão dinâmica das rotas de recolha através de algoritmos de IA, um exemplo de uma aplicação que reforça a eficiência operacional ao permitir a reconfiguração em tempo real dos circuitos, aumentando a sua eficiência geral.

### **Maior produtividade**

A adoção de soluções baseadas em IA tem demonstrado um impacto significativo na produtividade organizacional, através de múltiplas vias. A automatização de tarefas repetitivas ou de baixa complexidade permite libertar recursos humanos para funções de maior valor acrescentado. Este efeito é transversal aos diferentes setores analisados, refletindo-se tanto em atividades industriais como nos serviços públicos de gestão de resíduos.

Com a IA, tarefas anteriormente realizadas de forma manual, como a triagem, a monitorização de qualidade ou a recolha de dados, passam a ser executadas de forma automatizada, com maior rapidez, menor propensão ao erro humano e maior consistência. Este ganho operacional permite não apenas produzir mais em menos tempo, mas também garantir um controlo mais rigoroso sobre os processos da empresa, contribuindo para a redução de variabilidade nos resultados e para um conseqüente aumento na previsibilidade operacional.

Para além disso, a produtividade aumenta também pela capacidade de tomar decisões mais informadas e em tempo real, baseada em dados processados por algoritmos de ML. Esta inteligência aplicada aos processos promove ganhos indiretos, ao possibilitar o ajustamento contínuo das operações, a reconfiguração de recursos e a minimização de desperdícios em diferentes pontos da cadeia de valor, contribuindo para um modelo de operação mais ágil, responsivo e escalável, com implicações positivas no desempenho organizacional geral.

Importa ainda sublinhar que este aumento da produtividade não decorre apenas da substituição da mão-de-obra humana por máquinas e algoritmos, mas da reorganização inteligente das atividades onde a intervenção humana é valorizada, como por exemplo etapas que requerem supervisão ou decisão crítica. Trata-se, portanto, de um modelo de cooperação entre humanos e sistemas inteligentes, onde o potencial de ambos é maximizado.

### **Melhor serviço prestado**

Outro impacto transversal observado com a integração da IA nas empresas é a melhoria substancial na qualidade dos serviços disponibilizados aos seus stakeholders, sejam estes clientes, parceiros ou outros.

IA permite que as empresas desenvolvam soluções mais proativas de resposta às necessidades do público, com base na análise preditiva de comportamentos e padrões. Além disso, a IA possibilita uma comunicação mais direcionada e eficaz, adaptada ao perfil e ao contexto dos destinatários, o que é particularmente relevante nas campanhas de sensibilização conduzidas pela Lipor e Valorsul, tornando-as mais eficientes e socialmente relevantes.

Os uso de IA demonstram ser robustos e diversificados nos casos estudados. As empresas demonstram como estas tecnologias estão a ser utilizadas em múltiplas fases da cadeia de valor, desde ferramentas de apoio à prevenção e recolha inteligente, à triagem automatizada, valorização energética e à recuperação de matérias-primas. Estas iniciativas, segundo os entrevistados, conseguem ser integradas com sucesso nos sistemas, promovendo ganhos em sustentabilidade, eficiência e inovação tecnológica. Em conjunto, estas soluções ilustram a transversalidade possível da IA nas operações de uma empresa.

De forma transversal, verifica-se que a integração da IA no contexto da economia circular em Portugal se encontra em fase de consolidação, caracterizada por investimentos significativos em tecnologia e pela procura de soluções que aliem inovação, sustentabilidade e competitividade. Apesar das diferentes trajetórias e estágios de maturidade digital, os representantes destas empresas partilham a perceção de que a IA representa um elemento estratégico para o sucesso na transição para a economia circular, contribuindo para a criação de valor económico e ambiental.

<b>Impacto identificado</b>	<b>Empresa que o mencionou</b>
Redução de desperdício	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor
Maior eficiência	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor
Maior produtividade	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor
Melhor serviço prestado	Amorim Cork Solutions; Valorsul; Lipor

**Tabela 9**-Impactos identificados durante as entrevistas

## **CAPÍTULO V – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

---

Neste capítulo, são discutidos os resultados obtidos na presente investigação, procurando-se compará-los criticamente com os dados identificados na revisão sistemática de literatura. A análise visa compreender até que ponto as evidências recolhidas nas entrevistas realizadas a empresas portuguesas refletem, confirmam ou diferem dos usos, tecnologias e desafios destacados pela literatura existente. Esta abordagem permite não só validar os quadros teóricos, mas também evidenciar eventuais lacunas e oportunidades para investigações futuras.

## **5.1 Principais usos e tecnologias de IA: convergências e limites em Portugal**

As entrevistas realizadas revelaram uma forte correspondência entre os usos e tecnologias de IA descritas na literatura e aqueles que foram identificados nos casos estudados.

No que diz respeito aos usos da IA, os dados recolhidos confirmam os padrões mais consolidados na literatura, como a triagem de materiais, a análise de dados e a otimização de processos. Tal como evidenciado por Agrawal et al. (2021) e Mankar et al. (2024), estes usos representam áreas onde o impacto é direto, mensurável e alinhado com os princípios da economia circular. No entanto, as entrevistas revelaram menor atenção a usos apontados como estratégicos na literatura, como o apoio ao design de produtos e a geração automática de KPIs, o que pode revelar que ainda existe um foco mais operacional para a implementação de IA a nível nacional.

ML e computer vision são apontados em diversos estudos analisados como tecnologias centrais e relevantes no contexto da economia circular, estando associadas a ganhos significativos de eficiência e qualidade, sendo igualmente referidas durante as entrevistas, especialmente em processos de triagem e separação de materiais. Estas aplicações refletem a consolidação da IA como ferramenta para otimização de processos e redução de desperdícios, tal como evidenciado na literatura (Roberts et al., 2024; Rehman, 2024). Contudo, a análise crítica dos resultados evidencia uma lacuna na exploração de tecnologias mais emergentes, como a IA generativa (GenAI), destacada nos estudos mais recentes como potenciadora de novos modelos de negócio circulares e particularmente útil no processo de design de produtos. A ausência de certas tecnologias nos casos nacionais sugere um nível de maturidade tecnológica relativo ao uso de IA ainda em desenvolvimento.

É relevante destacar que os casos analisados evidenciam uma utilização robusta da IA, mas tendencialmente orientada para processos já estabelecidos dentro da lógica da economia circular. A triagem automatizada, por exemplo, surge como a aplicação mais consensual e consolidada, não apenas pelo seu impacto direto na eficiência e na redução do desperdício, mas também pela facilidade de quantificação dos seus resultados, como referido por representantes da Valorsul e da Amorim Cork Solutions. Esta preferência por aplicações com retorno mensurável é consistente com as conclusões de Sigüenza Tamayo et al. (2023), que identificam a quantificação de benefícios como fator decisivo na adoção de IA. Tal foco revela uma lógica onde a adoção tecnológica ocorre sobretudo quando associada a ganhos operacionais mensuráveis.

A análise de dados também se destaca nas entrevistas, onde os entrevistados mencionam os grandes volumes de dados que recolhem durante os seus processos e como IA possibilita uma análise melhor e mais eficiente destes.

Tecnologias como sensores inteligentes demonstram o carácter complementar das soluções adotadas nas empresas. Estes sensores, ao permitirem a recolha contínua de dados operacionais, viabilizam a atuação da IA em tempo real.

Por outro lado, como também se observa na revisão de literatura, a combinação entre IA e outras tecnologias emergentes, como por exemplo *digital twins*, permanece praticamente ausente nos casos nacionais analisados. Isso pode dever-se a limitações estruturais, mas também a uma lógica de investimento cautelosa adotada pelas empresas que privilegia soluções com retorno garantido.

## **5.2 Desafios associados ao uso de IA**

A análise das entrevistas reforça muitos dos desafios destacados pela literatura. Os custos elevados associados, amplamente apontados em diversos estudos [ex.: Rehman (2024) e Sigüenza Tamayo et al. (2023)] como principal desafio à adoção da IA por parte das empresas foram transversalmente referidos pelas empresas entrevistadas. No caso da Amorim Cork Solutions em específico foi mencionado o retorno do investimento relativamente rápido, destacando aqui uma relação entre o alto investimento inicial e o potencial de ganhos a médio/longo prazo.

Outro desafio crítico identificado tanto na literatura como nas entrevistas é a falta de competências no uso de IA. Tal como descrito em estudos como os de Shennib & Schmitt

(2021) e Roberts et al. (2024), a escassez de quadros técnicos especializados é um entrave à adoção mais ampla da IA. No contexto das empresas portuguesas entrevistadas, esta lacuna acaba por ser ultrapassada através de parcerias externas com universidades, centros de investigação e outras empresas, mas também existe preocupações a nível interno com programas de capacitação de trabalhadores, de modo a preparar e reconverter colaboradores para novas funções que acrescentem maior valor ao negócio, demonstrando que a formação e o reforço de competências são vistos como elementos centrais pelas empresas no sucesso das iniciativas de IA.

Este aspeto revela uma abordagem estratégica por parte das organizações, que reconhecem que a transformação digital não pode ocorrer sem investimento no capital humano. A reconversão de trabalhadores, particularmente aqueles com experiência operacional, é também percebida como uma forma eficaz de acelerar a adoção da IA, dado o conhecimento prático que estes profissionais têm dos processos.

Por outro lado, as entrevistas revelaram um desafio não amplamente discutido na literatura, mas que emergiu de forma clara na análise empírica: a necessidade de adaptação tecnológica ao contexto específico de cada empresa. Os entrevistados descreveram como as soluções de IA não são aplicáveis de forma direta e exigem customizações significativas para se adequarem às realidades do processo produtivo da empresa. Exemplos incluem os ajustes necessários nas linhas de triagem da Valorsul e a adaptação dos robôs para o processo de separação de rolhas na Amorim Cork Solutions, além do desenvolvimento interno de software próprio na Lipor para a monitorização da recolha de resíduos. Este tópico resultante das entrevistas evidencia a importância do desenvolvimento de soluções sob medida como condição para a eficácia da IA em contextos reais. A própria necessidade de adaptar sensores, algoritmos e interfaces para lidar com matérias-primas específicas mostra como os contextos industriais requerem abordagens altamente customizadas. A realidade das empresas portuguesas analisadas indica que o sucesso da IA depende, em parte, da sua integração contextualizada nos fluxos de trabalho, respeitando as especificidades do setor.

Por fim, destaca-se o foco dado às questões éticas e de segurança de dados. Embora estes aspetos não tenham sido apontados como barreiras operacionais imediatas ou como obstáculos que atualmente impeçam a adoção de IA, foram referidos de forma transversal nas entrevistas como áreas que exigem crescente atenção e cuidado. A Lipor, por exemplo, evidenciou preocupações específicas com o uso de LLMs e com as práticas

associadas à confidencialidade dos dados empresariais e pessoais, destacando que a proteção de dados é ainda mais crítica em ecossistemas interligados onde múltiplos atores partilham informação. As empresas reconhecem que, à medida que o uso da IA se aprofunda e se torna mais integrado nos seus processos, estas questões passarão a ter um peso crescente nas decisões estratégicas e operacionais.

### **5.3 Análise dos casos práticos e conclusões**

A análise destes casos tem sido feita ao longo de toda esta fase final da investigação. Estes casos em concreto acabam por confirmar e aprofundar muitos dos pontos identificados durante a revisão de literatura, ilustrando de forma concreta como a integração da IA na economia circular não é um conceito meramente teórico, mas uma realidade em evolução no contexto português, ainda que com níveis de maturidade tecnológica e digital distintos.

A Lipor, por exemplo, acaba por revelar uma abordagem progressiva em termos da incorporação da IA, centrada na otimização da recolha de resíduos, na triagem automatizada e no planeamento em função dos tipos de resíduos recebidos. A sua experiência ilustra como a IA pode ser aplicada de forma adaptada ao setor dos resíduos urbanos, reforçando o papel da digitalização na concretização dos princípios da economia circular. A combinação entre tecnologia própria, desenvolvida internamente, e parcerias com universidades reflete um modelo de integração tecnológica em linha com o que a literatura descreve como boas práticas para superar desafios de adaptação e custos, defendendo que parcerias externas e desenvolvimento conjunto são estratégias eficazes para colmatar lacunas técnicas e acelerar a adoção tecnológica (Graessler et al., 2025).

No caso da Amorim Cork Solutions, observa-se um forte alinhamento com os princípios da economia circular ao qual se juntou o reforço tecnológico proporcionado pela IA. Este caso serve como um exemplo do que Roberts et al. (2024) designam como reconfiguração de modelos de negócio com base na IA, em que a tecnologia é usada para valorizar ainda mais resíduos internos e externos, aumentando a eficiência e reduzindo perdas no processo de fabrico.

Por fim, o caso da Valorsul evidencia como a IA é integrada em operações de triagem e recuperação de materiais, mostrando um foco claro na otimização e sustentabilidade, características igualmente destacadas na literatura. Este caso acaba também por expor um aspeto menos mencionado, o papel dos trabalhadores humanos na adaptação e no sucesso das soluções de IA, aspeto isto argumentado por Ronaghi (2023) como

essencial para adaptar a tecnologia à realidade operacional. Esta presença dos trabalhadores da empresa torna-se possível através do feedback que estes disponibilizam à mesma.

Um ponto emergente foi a perceção do impacto real que a aplicação de IA teve nas práticas circulares. Em todos os casos, os entrevistados reconheceram ganhos significativos na eficiência operacional da empresas e na redução de desperdício.

Embora os casos estudados durante esta investigação ofereçam uma visão sobre a aplicação da IA no contexto da economia circular em Portugal, importa sublinhar que os casos analisados dizem respeito a grandes empresas com elevada capacidade de investimento, recursos especializados e maior maturidade digital, empresas com acesso a financiamento, parcerias tecnológicas e a capacidade de desenvolvimento interno de soluções. Uma realidade que se distingue significativamente da realidade em que operam as PME's em Portugal. As PME's tendem a enfrentar um conjunto de barreiras significativas já durante o processo de transição para um modelo de economia circular, como a falta de recursos financeiros, os custos associados no processo de adaptação às regulamentações e a falta de conhecimento técnico específico (Garcés-Ayerbe et al., 2019) e, muitas vezes, acabam por apresentar uma maturidade digital inferior em relação às grandes empresas. Acresce a esta realidade a perceção de risco associada à adoção de tecnologias complexas, especialmente num cenário onde os retornos podem ser incertos e dependentes de múltiplos fatores contextuais. A ausência de uma cultura digital consolidada nas PME's, juntamente com a pressão de curto prazo sobre os resultados financeiros, tende a privilegiar soluções mais convencionais e menos disruptivas. Esta lacuna entre grandes empresas e PME's em termos de acesso e aproveitamento das potencialidades da IA levanta preocupações em termos de coesão e competitividade económica, podendo aprofundar desigualdades tecnológicas e operacionais dentro do tecido empresarial nacional. Desigualdades estas que, se não forem mitigadas, podem criar assimetrias estruturais que dificultam a generalização de práticas da economia circular (Roberts et al., 2024).

Assim, ao interpretar os resultados deste trabalho, importa reconhecer que as conclusões extraídas dos casos das grandes empresas poderão não ser facilmente transponíveis para a realidade das PME's, que constituem ainda uma porção considerável da economia portuguesa. As recomendações e implicações para a prática empresarial devem, portanto,

ter em conta esta diversidade estrutural e de capacidades entre diferentes tipos de organizações.

No conjunto, estes casos demonstram uma realidade em Portugal onde a aplicação da IA no contexto da economia circular está a emergir de forma consistente, mas ainda marcada por desafios estruturais e pela necessidade de estratégias alinhadas com a realidade e especificidade de cada setor essencial para maximizar o impacto da IA, garantindo que a tecnologia serve as necessidades específicas de cada cadeia de valor (Ali et al., 2024). Estas experiências nacionais validam e ao mesmo tempo enriquecem as perspetivas identificadas na literatura, oferecendo exemplos concretos de implementação funcional da IA nas empresas.



O presente trabalho procurou compreender de que forma a IA pode apoiar as empresas na transição para a economia circular. Através da realização de entrevistas a representantes de empresas que atuam em Portugal com práticas circulares consolidadas e a realização de uma análise temática das mesmas, foi possível identificar as principais tecnologias de IA utilizadas, os seus principais usos e os desafios normalmente associados à sua implementação neste contexto.

A metodologia qualitativa adotada, assente nas entrevistas semiestruturadas e na análise temática, mostrou-se adequada para explorar a utilização de IA neste contexto mais específico.

A investigação permitiu atingir os objetivos definidos e proporcionar um novo contributo para a compreensão do papel da IA dentro deste contexto. Em primeiro lugar, foi possível identificar as tecnologias mais relevantes, destacando-se o uso de ML, computer vision e sensores inteligentes, bem como evidenciar a ausência de outras tecnologias identificadas na literatura. Em segundo lugar, analisaram-se os usos concretos da IA nas empresas que atuam em Portugal, confirmando padrões já amplamente descritos na literatura, como a triagem de materiais e a otimização de processos. Em terceiro lugar, foram identificados os principais desafios enfrentados, desde os custos elevados até à falta de competências, aos quais se juntou a necessidade de adaptação tecnológica ao contexto específico de cada organização. Finalmente, foi possível explorar as implicações da adoção da IA no contexto empresarial nacional, permitindo um entendimento amplo destes casos concretos.

Além disso, permitiu sistematizar literatura existente através de uma revisão estruturada e propor um enquadramento baseado em três pontos analíticos — usos, tecnologias e desafios — aplicados ao contexto em causa. De um ponto de vista mais empírico, contribui para a apresentação de evidências reais obtidas através das entrevistas, o mapeamento de usos concretos de IA dentro do contexto em causa, identificar as tecnologias mais utilizadas, destacar os principais desafios enfrentados e entender os benefícios associados, acrescentando mais profundidade e nuance à discussão sobre a adoção de IA no contexto empresarial.

As conclusões que podemos retirar desta investigação seriam: a relevância cada vez maior da IA na implementação de práticas da economia circular nas empresas, como é possível perceber pelos usos identificados durante a revisão de literatura e os exemplos de alguns

destes explicitados nas entrevistas; o mesmo caso para as tecnologias identificadas, como por exemplo machine learning, computer vision e sensores inteligentes que destacaram durante a investigação; os desafios associados identificados, como os custos, a qualidade e segurança dos dados, a falta de competências e outros que podem mudar a perceção das empresas perante este tipo de soluções; as contribuições que IA proporciona neste contexto e a sua situação atual nas empresas que atuam em Portugal.

Este trabalho evidencia ainda que, embora a IA já apresente casos de aplicação bem-sucedidos, o seu uso no contexto empresarial nacional relacionado com a economia circular ainda se encontra numa fase de crescimento e consolidação. As empresas em questão demonstram predisposição para investir e avançar com soluções tecnológicas inovadoras.

De forma geral, os resultados deste trabalho evidenciam que a IA já desempenha um papel relevante junto das práticas circulares, mas que o seu impacto poderá ser ainda mais expressivo à medida que se ultrapassarem diversas barreiras como os custos, a falta de competências e a necessidade de soluções adaptadas a cada contexto. Para as empresas, este estudo reforça a importância de investir de forma estratégica e sustentada, articulando inovação tecnológica com o conhecimento interno e parcerias externas. Reconhece-se, contudo, que as conclusões obtidas refletem um conjunto concreto de casos e que a sua transposição direta para outros casos deve ser feita com cautela.

Por fim, a análise realizada indica que, embora o caminho da integração da IA na economia circular em Portugal esteja apenas a começar, há sinais claros de dinamismo e abertura à inovação, criando condições para que este se torne um futuro fator central da competitividade e da sustentabilidade no contexto empresarial nos próximos anos.

## **6.1 Desafios e limitações**

Geralmente recorrente em investigações, este estudo também apresenta algumas limitações que precisam de ser reconhecidas:

- A amostra estudada, apesar de relevante dentro do contexto desta investigação, é limitada. Uma amostra mais alargada poderá fornecer uma perspetiva mais abrangente;

- A revisão sistemática de literatura apesar de rigorosa, ao utilizar palavras-chave específicas poderá ter deixado fora artigos relevantes com terminologias mais distintas:
- A rápida evolução tecnologia da IA pode implicar uma alteração significativas em curtos espaços de tempo aos casos analisados e às tecnologias descritas, tornando necessário uma atualização constante do conhecimento desta área .

Apesar destas limitações, o trabalho fornece contributos teóricos e empíricos relevantes para o estudo da aplicação de IA na economia circular, constituindo uma base sólida para futuras investigações neste domínio.

## **6.2 Trabalhos futuros**

Tendo em conta o escopo deste trabalho, as suas limitações e as mudanças constante do campo em análise, propõem-se as seguintes direções para possíveis investigações futuras:

- Realização de estudos mais abrangentes, analisar mais casos práticos de diferentes setores de atividades de forma a compreender ainda mais a integração de IA neste contexto;
- Expansão da amostra de entrevistas, incluindo por exemplo PME e start-ups, que pode resultar em uma análise diferente e mais específica para empresas de menor dimensão;
- Investigar a interação entre IA e outras tecnologias e o seu impacto nos processos empresariais;
- Realização de estudos comparativos entre diferentes regiões e/ou países, de forma a identificar possíveis diferenças no grau de maturidade digital das empresas em relação à IA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., Luthra, S., Majumdar, A., & Kazancoglu, Y. (2021). An exploratory state-of-the-art review of artificial intelligence applications in circular economy using structural topic modeling. *Operations Management Research*, 15(3), 609–626
- Akinode, J. L., & Oloruntoba, S. A. (2020). Artificial intelligence in the transition to circular economy. *American Journal of Engineering Research*, 9(6), 185–190.
- Akhtar, P., Ghouri, A. M., Ashraf, A., Lim, J. J., Khan, N. R., & Ma, S. (2024). Smart product platforming powered by AI and generative AI: Personalization for the circular economy. *International Journal of Production Economics*, 273, 109283. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109283>
- 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*, 1–37. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02101-w>
- Ali, Z. A., Zain, M., Pathan, M. S., & Mooney, P. (2024). Contributions of artificial intelligence for circular economy transition leading toward sustainability: an explorative study in agriculture and food industries of Pakistan. *Environment, Development and Sustainability*, 26(8), 19131-19175. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03458-9>
- Arruda, E. H., Melatto, R. A. P. B., Levy, W., & de Melo Conti, D. (2021). Circular economy: A brief literature review (2015–2020). *Sustainable Operations and Computers*, 2, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.05.001>
- 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, 120420. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120420>
- Barros, M. V., Salvador, R., do Prado, G. F., de Francisco, A. C., & Piekarski, C. M. (2021). Circular economy as a driver to sustainable businesses. *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2020.100006>

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

Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*. SAGE Publications.

Chidepatil, A., Bindra, P., Kulkarni, D., Qazi, M., Kshirsagar, M., & Sankaran, K. (2020). From trash to cash: How blockchain and multi-sensor-driven artificial intelligence can transform circular economy of plastic waste? *Administrative Sciences*, 10(2), 23. <https://doi.org/10.3390/admsci10020023>

Cîmpeanu, I. A., Dragomir, D. A., & Zota, R. D. (2022). Using artificial intelligence for the benefit of the circular economy. In *Proceedings of the International Conference on Business Excellence* (Vol. 16, No. 1, pp. 294–303). Sciendo

Clark, T., Foster, L., Sloan, L., & Bryman, A. (2021). *Bryman's social research methods* (6<sup>a</sup> ed.). Oxford University Press.

Danish, M. S. S., & Senjyu, T. (2023). Shaping the future of sustainable energy through AI-enabled circular economy policies. *Circular Economy*, 2(2), 100040. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100040>

Deveci, M., Delen, D., & Ding, W. (2024). AI-based decision support systems for sustainable business management under circular economy. *Annals of Operations Research*, 1-3. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06347-0>

Ellen MacArthur Foundation, & McKinsey Center for Business and Environment. (2015). *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>

Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and edge AI as key technological enablers for a sustainable digital transition towards a smart circular economy: An industry 5.0 use case. *Sensors*, 21(17), 5745. <https://doi.org/10.3390/s21175745>

Garcés-Ayerbe, C., Rivera-Torres, P., Suárez-Perales, I., & Leyva-de la Hiz, D. I. (2019). *Is it possible to change from a linear to a circular economy? An overview of*

opportunities and barriers for European small and medium-sized enterprise companies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(8), 851. <https://doi.org/10.3390/ijerph16050851>

Graessler, I., Weyrich, M., Pottebaum, J., & Kamm, S. (2025). Information circularity assistance based on extreme data: Utilizing artificial intelligence, scenario-technique and digital twins to solve challenges of product creation for circular economy. *at-Automatisierungstechnik*, 73(1), 3–21. <https://doi.org/10.1515/auto-2024-0039>

Haenlein, M., & Kaplan, A. (2019). Artificial Intelligence. *California Management Review*, 61(4), 5–14. <https://doi.org/10.1177/0008125619864925>

Hasan, M. M., Plamthottathil, R. K., Morshed, J., Sarkar, D., Hameed, N., & Cirstea, S. (2023). Circulogy: an AI-enabled blockchain-based e-Waste management framework using Non-Fungible Tokens (NFT) to achieve net zero and imply the circular economy. In *2023 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC)* (pp. 1-3). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICBC56567.2023.10174985>

Jain, A., Vishwakarma, A., & Bhakta, D. (2025). Assessing the impact of artificial intelligence and circular economy on the healthcare sector: An empirical evidence from the Indian context. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144315. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144315>

Kang, M., Yul, P. S., Chung, M. A., & Han, D. H. (2024). No-code AI: Concepts and Applications in Machine Learning, Visualization, and Cloud Platforms.

Kaya, P. H. (2024). CAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE ACCELERATE THE TRANSITION TO A CIRCULAR ECONOMY?. *Eurasian Research Journal*, 6(3), 7-19.

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

Kothari, C. R. (2004). *Research methodology: Methods and techniques* (2<sup>a</sup> ed.). New Age International Publishers.

- Kowsari, E., Ramakrishna, S., Gheibi, M., & Chinnappan, A. (2023). Marine plastics, circular economy, and artificial intelligence: A comprehensive review of challenges, solutions, and policies. *Journal of Environmental Management*, *345*, 118591. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118591>
- Lanzalonga, F., Marseglia, R., Irace, A., & Biancone, P. P. (2024). The application of artificial intelligence in waste management: Understanding the potential of data-driven approaches for the circular economy paradigm. *Management Decision* <https://doi.org/10.1108/MD-10-2023-1733>
- Linnenluecke, M. K., Marrone, M., & Singh, A. K. (2020). Conducting systematic literature reviews and bibliometric analyses. *Australian Journal of Management*, *45*(2), 175–194. <https://doi.org/10.1177/0312896219877678>
- Mankar, V. A., Ali, A. J., Kamrani, R., Sure, Y., Kediya, S., & Gudadhe, A. (2024, November). The role of AI in circular economy supply chains: A comparative analysis of industry practices. In *2024 2nd DMIHER International Conference on Artificial Intelligence in Healthcare, Education and Industry (IDICAIEI)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDICAIEI61867.2024.10842918>
- Mboli, J. S., Thakker, D., Mishra, J. L., & Sivarajah, S. (2021, January). Domain experts and natural language processing in the evaluation of circular economy business model ontology. In *2021 IEEE 15th International Conference on Semantic Computing (ICSC)* (pp. 374-379). IEEE.
- McIntosh, M. J., & Morse, J. M. (2015). Situating and Constructing Diversity in Semi-Structured Interviews. *Global Qualitative Nursing Research*, *2*, 1–12 <https://doi.org/10.1177/2333393615597674>
- Mehdipour, Z. (2024, June). The application of AI for electronic LCA data and assessment toward the circular economy. In *2024 Electronics Goes Green 2024+ (EGG)* (pp. 1–5). IEEE.
- Núñez-Cacho, P., Mylonas, G., Kalogeras, A., & Molina-Moreno, V. (2024). Exploring the transformative power of AI in art through a circular economy lens: A systematic literature review. *Heliyon*, *10*(4), e27053. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25388>

- Onyeaka, H., Tamasiga, P., Nwauzoma, U. M., Miri, T., Juliet, U. C., Nwaiwu, O., & Akinsemolu, A. A. (2023). Using artificial intelligence to tackle food waste and enhance the circular economy: Maximising resource efficiency and minimising environmental impact: A review. *Sustainability*, *15*(13), 10482. <https://doi.org/10.3390/su151310482>
- Pathan, M. S., Richardson, E., Galvan, E., & Mooney, P. (2023). The role of artificial intelligence within circular economy activities: A view from Ireland. *Sustainability*, *15*(12), 9451. <https://doi.org/10.3390/su15129451>
- Pertz, L. M. Smart Circularity: Exploring the Impact of Artificial Intelligence on the Circular Economy Building Block B: Circular Business Models
- Petrik, D., & Härer, F. (2024). Conceptualizing AI-driven Knowledge Services for a Circular Economy. In *2024 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC61926.2024.10794308>
- Platon, V., Pavelescu, F. M., Antonescu, D., Constantinescu, A., Frone, S., Surugiu, M., ... & Popa, F. (2024). New evidence about artificial intelligence and eco-investment as boosters of the circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, *35*, 103685. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103685>
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *179*, 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>
- Rehman, M. M. U. (2024). *Exploring the link between artificial intelligence and circular economy in the fashion industry: An example of Lennol Oy* [Master's thesis, Seinäjoki University of applied sciences].
- Roberts, H., Zhang, J., Bariach, B., Cowls, J., Gilbert, B., Juneja, P., & Floridi, L. (2024). Artificial intelligence in support of the circular economy: Ethical considerations and a path forward. *AI & Society*, *39*(3), 1451–1464. <https://doi.org/10.1007/s00146-022-01596-8>
- Ronaghi, M. H. (2023). The influence of artificial intelligence adoption on circular economy practices in manufacturing industries. *Environment, Development and Sustainability*, *25*(12), 14355–14380. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02670-3>

- Sankaran, K. (2019). Carbon emission and plastic pollution: How circular economy, blockchain, and artificial intelligence support energy transition? *Journal of Innovation Management*, 7(4), 7–13. [https://doi.org/10.24840/2183-0606\\_007.004\\_0002](https://doi.org/10.24840/2183-0606_007.004_0002)
- Shahbaz, M., Dinçer, H., Yüksel, S., & Jiao, Z. (2025). An assessment of circular economy-oriented renewable energy projects via artificial intelligence recommender systems and a hybrid quantum fuzzy decision-making approach. *Renewable Energy*, 213, 122673. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122673>
- Sestino, A., & De Mauro, A. (2022). Leveraging artificial intelligence in business: Implications, applications and methods. *Technology Analysis & Strategic Management*, 34(1), 16–29. <https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1883583>
- Seyyedi, S. R., Kowsari, E., Gheibi, M., Chinnappan, A., & Ramakrishna, S. (2024). A comprehensive review integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model. *Journal of Cleaner Production*, 142584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142584>
- Sheikh, A., Simske, S. J., & Chong, E. K. (2024). Evaluating artificial intelligence models for resource allocation in circular economy digital marketplace. *Sustainability*, 16(23), 10601. <https://doi.org/10.3390/su162310601>
- Shennib, F., & Schmitt, K. (2021, October). Data-driven technologies and artificial intelligence in circular economy and waste management systems: A review. In *2021 IEEE International Symposium on Technology and Society (ISTAS)* (pp. 1–5). IEEE.
- Sigüenza Tamayo, W., et al. (2023). *Reinforcing the Closing of the Circular Economy Loop Through Artificial Intelligence and Robotics*. In E. Alfnes et al. (Eds.), *Advances in Production Management Systems* (pp. 432–443). Springer.
- Steinbrenner, A. S. (2023). *Smart Circularity: Exploring the Impact of Artificial Intelligence on the Circular Economy-Building Block A: Circular Product Design* [Master's thesis, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal)].
- Thielmann, L. S. (2023). *Smart Circularity: Exploring the Impact of Artificial Intelligence on the Circular Economy: Building Block C: Cross-Sector Collaboration* [Master's thesis, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal)].

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*, 31(5), 4772–4782. <https://doi.org/10.1002/csr.2827>

Valorsul. (2025). *Valorsul investe em robô de triagem com IA para tratar resíduos urbanos*. <https://www.valorsul.pt/pt/informacao/noticias/valorsul-investe-em-robot-de-triagem-com-ia-para-tratar-residuos-urbanos/>

Van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2021). Automation of systematic literature reviews: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 136, 106589. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106589>

Wilson, M., Paschen, J., & Pitt, L. (2022). The circular economy meets artificial intelligence (AI): Understanding the opportunities of AI for reverse logistics. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 33(1), 9–25. <https://doi.org/10.1108/MEQ-10-2020-0222>

Wysokińska, Z. (2016). The "new" environmental policy of the European Union: A path to development of a circular economy and mitigation of the negative effects of climate change. *Comparative Economic Research. Central and Eastern Europe*, 19(2), 57-73.

Yang, Y., & Siau, K. (2018). A qualitative research on marketing and sales in the artificial intelligence age. *Proceedings of the Midwest United States Association for Information Systems (MWAIS) 2018 Conference*.



## Apêndice I – Lista de documentos analisados durante a revisão sistemática de literatura

ID	Ano	Título do artigo	Referência
1	2025	<i>An assessment of circular economy-oriented renewable energy projects via artificial intelligence recommender systems and a hybrid quantum fuzzy decision-making approach</i>	Shahbaz et al.
2	2021	<i>Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities</i>	Bag et al.
3	2024	<i>Smart product platforming powered by AI and generative AI: Personalization for the circular economy</i>	Akhtar et al.
4	2024	<i>Exploring the transformative power of AI in art through a circular economy lens. A systematic literature Review</i>	Núñez-Cacho et al.
5	2023	<i>Shaping the future of sustainable energy through AI-enabled circular economy policies</i>	Danish e Senjyu
6	2022	<i>The circular economy meets artificial intelligence (ai) – understanding the opportunities of ai for reverse logistics</i>	Wilson et al.
7	2023	<i>The Role of Artificial Intelligence within Circular Economy Activities—A View from Ireland</i>	Pathan et al.
8	2024	<i>Artificial intelligence in support of the circular economy: ethical considerations and a path forward</i>	Roberts et al.

9	2023	<i>The influence of artificial intelligence adoption on circular economy practices in manufacturing industries</i>	Ronaghi
10	2024	<i>The application of artificial intelligence in waste management: understanding the potential of data-driven approaches for the circular economy paradigm</i>	Lanzalonga et al.
11	2024	<i>A conceptual model of artificial intelligence effects on circular economy actions</i>	Tutore et al.
12	2022	<i>Using artificial intelligence for the benefit of the circular economy</i>	Cîmpeanu et al.
13	2024	<i>Evaluating Artificial Intelligence Models for Resource Allocation in Circular Economy Digital Marketplace</i>	Sheikh et al.
14	2023	<i>Reinforcing the Closing of the Circular Economy Loop Through Artificial Intelligence and Robotics</i>	Sigüenza Tamayo et al.
15	2024	<i>Circular Economy Advances with Artificial Intelligence and Digital Twin: Multiple-Case Study of Chinese Industries in Agriculture</i>	Ali, Zain, Hasar et al.
16	2022	<i>An Exploratory State-of-the-Art Review of Artificial Intelligence Applications in Circular Economy using Structural Topic Modeling</i>	Agrawal et al.
17	2024	<i>The Application of AI for electronic LCA data and assessment toward the circular economy</i>	Mehdipour
18	2021	<i>Data-driven technologies and artificial intelligence in circular economy and waste management systems: a review</i>	Shennib e Schmitt
19	2020	<i>From Trash to Cash: How Blockchain and Multi-Sensor-Driven Artificial Intelligence Can</i>	Chidepatil et al.

		<i>Transform Circular Economy of Plastic Waste?</i>	
20	2021	<i>Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case</i>	Fraga-Lamas et al.
21	2023	<i>Circulogy: An AI-enabled blockchain-based e-Waste management Framework using Non-Fungible Tokens (NFT) to achieve net zero and imply the circular economy</i>	Hasan et al.
22	2023	<i>Evidence-based AI, ethics and the circular economy of knowledge</i>	Berbenni-Rehm
23	2025	<i>Assessing the impact of artificial intelligence and circular economy on the healthcare sector: An empirical evidence from the Indian context</i>	Jain et al.
24	2024	<i>The Role of AI in Circular Economy Supply Chains: A Comparative Analysis of Industry Practices</i>	Mankar et al.
25	2024	<i>Conceptualizing AI-driven Knowledge Services for a Circular Economy</i>	Petrik e Härer
26	2025	<i>Information Circularity Assistance based on extreme data</i>	Graessler et al.
27	2023	<i>Smart Circularity: Exploring the Impact of Artificial Intelligence on the Circular Economy-Building Block A: Circular Product Design</i>	Steinbrenner
28	2023	<i>Smart Circularity: Exploring the Impact of Artificial Intelligence on the Circular Economy Building Block C: Cross-Sector Collaboration</i>	Thielmann

29	2019	<i>Carbon Emission and Plastic Pollution: How Circular Economy, Blockchain, and Artificial Intelligence Support Energy Transition?</i>	Sankaran
30	2023	<i>Using Artificial Intelligence to Tackle Food Waste and Enhance the Circular Economy: Maximising Resource Efficiency and Minimising Environmental Impact: A Review</i>	Onyeaka et al.
31	2023	<i>Marine plastics, circular economy, and artificial intelligence: A comprehensive review of challenges, solutions, and policies</i>	Kowsari et al.
32	2024	<i>Exploring the Link Between Artificial Intelligence and Circular Economy in the Fashion Industry</i>	Rehman
33	2024	<i>A comprehensive review integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model</i>	Seyyedi et al.
34	2024	<i>New evidence about artificial intelligence and eco-investment as boosters of the circular economy</i>	Platon et al.
35	2024	<i>Contributions of artificial intelligence for circular economy transition leading toward sustainability: an explorative study in agriculture and food industries of Pakistan</i>	Ali, Zain, Pathan et al.
36	2024	<i>Can artificial intelligence accelerate the transition to a circular economy?</i>	Kaya
37	2024	<i>AI-based decision support systems for sustainable business management under circular economy</i>	Deveci et al.
38	2023	<i>Smart Circularity: Exploring the Impact of Artificial Intelligence on the Circular</i>	Pertz

*Economy Building Block B: Circular Business  
Models*

**Tabela 10-** Documentos da revisão de literatura analisados

**Fonte:** Elaboração própria (baseado em Van Dinter et al., 2021)

## **Apêndice II – Email de Pedido de Participação para a Entrevista**

**Assunto:** Pedido de Colaboração Académica ISCAP – Estudo sobre IA e Economia Circular

**Mensagem:**

DD de MM de 2025

Bom dia,

O meu nome é Gonçalo Cruz e sou estudante do 2.º ano do Mestrado em Informação Empresarial no ISCAP – Instituto Superior de Contabilidade e Administração do Porto.

Atualmente, estou a desenvolver a minha dissertação de mestrado, cujo tema é: **“O papel da Inteligência Artificial no desenvolvimento de estratégias de negócio no contexto da Economia Circular”**. O estudo visa compreender como a Inteligência Artificial está a ser utilizada pelas empresas para potenciar práticas circulares, identificando os principais benefícios e desafios associados.

Nesse sentido, venho por este meio solicitar a vossa colaboração para uma entrevista, que visa compreender a vossa experiência na aplicação de soluções de IA e sustentabilidade. A entrevista poderá ser agendada em data e formato (presencial ou online) mais convenientes para a vossa disponibilidade.

Todos os dados recolhidos serão utilizados exclusivamente para fins académicos e tratados com total confidencialidade.

Ficaria extremamente grato pela vossa colaboração, que contribuirá significativamente para a qualidade e relevância desta minha investigação.

Caso estejam disponíveis ou queiram esclarecer alguma informação antes de aceitar, estarei ao dispor.

Cumprimentos,

Gonçalo Daniel Oliveira Cruz

---