

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO-UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA E GESTÃO DO
CONHECIMENTO

VALQUIRIA DEMARCHI ARNS

**FRAMEWORK PARA IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0
QUE PROMOVA A ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE PÓS-COLHEITA**

SÃO PAULO
2024

VALQUIRIA DEMARCHI ARNS

**FRAMEWORK PARA IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0
QUE PROMOVA A ECONOMIA ICRCULAR NO SETOR DE PÓS-COLHEITA**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento – PPGI da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Informática e Gestão do Conhecimento.

Orientador Professor Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto
Coorientador Professor Dr. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto

SÃO PAULO

2024

Arns, Valquiria Demarchi.

Framework para implantação de tecnologias da indústria 4.0 que promova a economia circular no setor de pós-colheita. / Valquiria Demarchi Arns. 2024.

136 f.

Tese (Doutorado)- Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2024.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

1. Economia circular. 2. Indústria 4.0 e tecnologias habilitadoras.
3. Pós-colheita. 4. Agronegócio.
- I. Pinto, Luiz Fernando Rodrigues. II. Título

CDU 004

VALQUIRIA DEMARCHI ARNS

**FRAMEWORK PARA IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0
QUE PROMOVA A ECONOMIA ICRCULAR NO SETOR DE PÓS-COLHEITA**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento – PPGI da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Informática e Gestão do Conhecimento.

São Paulo, 26 de novembro de 2024.

Presidente: Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto, Orientador, UNINOVE

Membro: Prof. Dr. Geraldo Cardoso De Oliveira Neto, Coorientador, UFABC

Membro: Prof. Dr.: André Felipe Henriques Librantz, UNINOVE

Membro: Prof. Dr.: Ivanir Costa, UNINOVE

Membro Externo: Prof(a). Dr(a). Jaqueline Silva da Rosa, UFRR

Membro Externo: Prof. Dr.: Walter Cardoso Satyro, UNINOVE

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, pela saúde e força durante os momentos difíceis, assim como à Nossa Senhora, por estar sempre ao meu lado nessa jornada acadêmica. Agradeço, de coração, aos meus pais, Josephina e José Francisco, que me ensinaram que a educação é um valor e nunca deixaram de me encorajar a perseguir meus sonhos. Ao meu companheiro, Fabio, que esteve ao meu lado em todos os momentos, motivando e ajudando a manter o foco e os pés no chão. Sou eternamente grata a toda a minha família pelo apoio incondicional, incluindo meu filho, Gabriel.

Desejo expressar minha profunda gratidão aos orientadores, Dr. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto e Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto, por seu constante ensinamento e apoio. Agradeço especialmente aos professores Lucato, Dário e Milton, por seu encorajamento e orientação, nunca permitindo que eu desistisse. Um agradecimento especial à Ana, que me auxiliou na organização e no cumprimento das obrigações, pelo suporte, disponibilidade e atenção.

Gostaria de expressar minha gratidão à UNINOVE, por acreditar em mim em um programa tão importante de incentivo à pós-graduação e à formação de pesquisadores. Além disso, agradeço à Capes, ao Ministério da Educação e ao Governo Federal, pelo incentivo e confiança depositados por meio da concessão de bolsas de estudo.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os amigos que fiz na UNINOVE, que me ajudaram a desenvolver este trabalho, com destaque para Gabriel, Rosangela, Walter e Micheline. Suas contribuições foram inestimáveis.

“O desafio superado revela a força interior do indivíduo”.

(Ralph Waldo Emerson)

RESUMO

O agronegócio sustenta lares ao redor do mundo, empregando quase metade da população global e desempenhando um papel central no fornecimento de empregos e meios de subsistência. No Brasil, o setor é particularmente significativo, responsável por cerca de 37% dos empregos formais e mais de 19 milhões de trabalhos diretos e indiretos. Contudo, enfrenta desafios como a escassez de recursos, as mudanças climáticas e o uso de insumos agrícolas, que impõem a necessidade de estratégias sustentáveis para sua viabilidade futura. Neste contexto, a economia circular e a digitalização emergem como soluções promissoras, com a integração de tecnologias habilitadoras e práticas circulares visando sustentar a viabilidade do agronegócio frente ao crescimento populacional e à crescente demanda global por alimentos. A digitalização, em particular, alinhada à economia circular, apresenta-se como um caminho viável para antecipar e atender às tendências futuras, promovendo uma abordagem sustentável em toda a cadeia produtiva. A pesquisa em questão investigou a interseção entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas circulares no âmbito do pós-colheita do agronegócio brasileiro. Utilizando uma Método Survey que incluiu uma revisão sistemática da literatura e a aplicação de questionários às empresas do setor, a pesquisa avaliou a presença de uma relação entre as influências das tecnologias e as práticas circulares. Como resultado prático, a pesquisa propôs um framework de implantação, refinado mediante análises, contribuições e validações de especialistas. A contribuição social do estudo estende-se além do âmbito acadêmico, buscando impactar positivamente a sociedade ao promover a circularidade no pós-colheita, alinhada às tendências globais de sustentabilidade e posicionando o setor de forma competitiva em um cenário internacional em constante evolução. Este estudo confirmou a eficácia da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 com práticas de economia circular no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro, revelando uma relação positiva entre inovações tecnológicas e sustentabilidade operacional. Isso contribui para o avanço teórico e para práticas empresariais mais sustentáveis. Reconhecendo limitações específicas do contexto brasileiro, o trabalho sugere futuras investigações em áreas emergentes e a longo prazo para fortalecer a adoção dessas práticas no agronegócio global.

Palavras-chave: Economia Circular, Indústria 4.0 e Tecnologias Habilitadoras, Pós-colheita, Agronegócio.

ABSTRACT

The agribusiness sector sustains households around the world, employing nearly half of the global population and playing a central role in providing jobs and livelihoods. In Brazil, the sector is particularly significant, accounting for about 37% of formal employment and more than 19 million direct and indirect jobs. However, it faces challenges such as resource scarcity, climate change, and the excessive use of agricultural inputs, which impose the need for sustainable strategies for its future viability. In this context, the circular economy and digitalization emerge as promising solutions, with the integration of enabling technologies and circular practices aimed at sustaining the viability of agribusiness in the face of population growth and increasing global demand for food. Digitalization, in particular, aligned with the circular economy, presents itself as a viable path to anticipate and meet future trends, promoting a sustainable approach throughout the production chain. The research in question investigated the intersection between Industry 4.0 technologies and circular practices in the post-harvest context of Brazilian agribusiness. Using a methodology that included a systematic literature review and the application of questionnaires to companies in the sector, the research evaluated the presence of a relationship between the influences of technologies and circular practices. Consultations with experts in the field were carried out to improve the diagnosis, resulting in a comprehensive and up-to-date view of the circular economy and technologies within agribusiness. As a practical result, the research proposed an integrated service framework, refined through analyses, contributions, and validations by experts. The social contribution of the study extends beyond the academic sphere, seeking to positively impact society by promoting circularity in post-harvest, aligned with global sustainability trends and positioning the sector competitively in an ever-evolving international scenario. This study confirmed the effectiveness of integrating Industry 4.0 technologies with circular economy practices in the post-harvest sector of Brazilian agribusiness, revealing a positive relationship between technological innovations and operational sustainability. This contributes significantly to theoretical advancement and more sustainable business practices. Recognizing specific limitations of the Brazilian context, the work suggests future investigations in emerging areas and in the long term to strengthen the adoption of these practices in the global agribusiness.

Keywords: Circular Economy, Industry 4.0 and Enabling Technologies, Post-harvest, Agribusiness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comércio Exterior Brasileiro – Agronegócio 2024.....	21
Figura 2 - Principais estados exportadores – Agronegócio 2022	22
Figura 3 - Evolução da capacidade estática de armazenagem e a produção agrícola – 2001-2021	23
Figura 4 - Déficit de capacidade estática por Microrregião Brasileira.....	25
Figura 5 - Delimitação da pesquisa	29
Figura 6 - Estrutura do Trabalho	32
Figura 7: Cadeia do Agronegócio.....	37
Figura 8 - Sequência de adoção de tecnologias habilitadoras para propor o framework conceitual das práticas circulares	61
Figura 9 - Framework para o pós-colheita.....	67
Figura 10 - Etapas para a seleção dos trabalhos	75
Figura 11 - Interpretação da correlação de Spearman	81
Figura 12 - Análise de Variância – ANOVA (dados – respondente, tamanho e cadeia)	85
Figura 13 - Framework para o setor de Pós-colheita.....	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Programa para a Construção e Ampliação de Armazéns – PCA	26
Quadro 2 - Exportação do Agronegócio Brasileiro em Toneladas.....	27
Quadro 3: Monitoramento de dados do setor de pós-colheita	69
Quadro 4 – Quadro de palavras utilizadas para o protocolo de busca.....	72
Quadro 5 - Critérios de inclusão e de exclusão	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de artigos	34
Tabela 2 - Tecnologias da Indústria 4.0	43
Tabela 3 - Práticas da Economia Circular adotadas na pesquisa.....	47
Tabela 4 - Relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas da Economia Circular .	57
Tabela 5 - Quadro de tecnologias propostas para gerar práticas circulares.....	600
Tabela 6 - Análise de Variância Método: Codificação de preditores categóricos.....	94
Tabela 7 - Coeficientes	94
Tabela 8 - Equação de Regressão	95
Tabela 9 - Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas.....	96
Tabela 10 - Resumo dos valores das Correlações de Spearman, com valor-p	99

SUMÁRIO

1.	<i>INTRODUÇÃO</i>	13
1.1.	<i>PROBLEMA E LACUNA DE PESQUISA</i>	15
1.2.	<i>OBJETIVOS</i>	19
1.2.1.	<i>Objetivo geral</i>	20
1.2.2.	<i>Objetivos específicos</i>	20
1.3.	<i>JUSTIFICATIVA</i>	20
1.4.	<i>DELIMITAÇÃO DA PESQUISA</i>	29
1.5.	<i>ESTRUTURA DO TRABALHO</i>	31
2.	<i>REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA</i>	33
2.1.	<i>AGRONEGÓCIO</i>	35
2.2.	<i>TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0</i>	39
2.3.	<i>ECONOMIA CIRCULAR</i>	44
2.4.	<i>A RELAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E A ECONOMIA CIRCULAR NO AGRONEGÓCIO</i>	50
2.5.	<i>CÓMO PROPOR UM FRAMEWORK PARA IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 QUE PROMOVA A ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE PÓS-COLHEITA DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO</i>	58
2.5.1.	<i>Framework conceitual proposto para promover práticas circulares integradas às tecnologias da indústria 4.0 no pós-colheita do agronegócio</i>	64
3.	<i>METODOLOGIA DE PESQUISA</i>	71
3.1.	<i>DEFINIÇÃO DO PROBLEMA</i>	71
3.2.	<i>DELINEAMENTO DO MÉTODO DE PESQUISA</i>	76
3.3.	<i>COLETA DE DADOS</i>	78
3.4.	<i>PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS</i>	79
4.	<i>RESULTADOS</i>	83
4.1.	<i>AVALIAÇÃO DA PESQUISA</i>	83
4.2.	<i>ANÁLISE PRELIMINAR ESTATÍSTICA</i>	83
4.2.1.	<i>Análise das notas de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e de práticas da Economia Circular — Média por respondente</i>	83
4.2.2.	<i>ANOVA para análise da influência do tamanho da empresa e influência dos dados do respondente</i>	85
4.2.3.	<i>Análise de Pareto</i>	92
4.2.4.	<i>Análise de Regressão</i>	93
4.3.	<i>CORRELAÇÃO DE SPEARMAN</i>	98

4.4.	ATUALIZAÇÃO DA ARQUITETURA DO FRAMEWORK PROPOSTO	106
5.	DISCUSSÕES	111
6.	CONCLUSÃO.....	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
	APÊNDICES.....	127

1. INTRODUÇÃO)

Quase metade da população mundial vive em lares vinculados a sistemas do agronegócio, sendo este uma das principais fontes de emprego e meio de vida em muitos países (Santos *et al.*, 2023). No Brasil, o setor é responsável por cerca de 37% dos empregos formais, gerando mais de 19 milhões de empregos diretos e indiretos (CNA Brasil, 2020). Diante da importância socioeconômica do agronegócio, torna-se essencial buscar soluções que promovam a sustentabilidade e a eficiência do setor. Nesse contexto, a Economia Circular, a Indústria 4.0 e as Tecnologias Habilitadoras emergem como estratégias cruciais. A adoção dessas práticas e tecnologias pode transformar o setor de pós-colheita do agronegócio, reduzindo desperdícios e otimizando processos. Esta seção explora como essas inovações podem ser integradas ao agronegócio, promovendo um desenvolvimento sustentável e eficiente.

A intensificação da produção do agronegócio, aliada à escassez de recursos, à mudança climática global e ao uso de insumos agrícolas, tem gerado o aumento da demanda por alimentos, causando um impacto negativo ao solo, à água e à biodiversidade. As consequências desse cenário são profundas e demandam uma abordagem cuidadosa e inovadora (IPBES, 2019). A degradação do solo compromete sua capacidade produtiva a longo prazo; a poluição da água afeta ecossistemas aquáticos; e a biodiversidade enfrenta ameaças crescentes. Em face desses desafios, é preciso buscar soluções sustentáveis e adotar práticas agrícolas que equilibrem o aumento da produção e a preservação ambiental, garantindo, assim, um futuro viável para as gerações vindouras (Kastner *et al.*, 2020).

Nesse cenário, a economia circular (EC) e as tecnologias digitais, especialmente em decorrência das mudanças provocadas pela indústria 4.0, representam uma estratégia para apoiar a sustentabilidade do agronegócio (Rajput *et al.*, 2019). A primeira se trata de um modelo econômico que visa minimizar o desperdício de recursos naturais, com impactos sustentáveis (Kouhizadeh *et al.*, 2020); e a segunda representa a quarta revolução industrial, caracterizada pela convergência de tecnologias avançadas.

A adoção de tecnologias da indústria 4.0 e de práticas circulares no agronegócio, associada ao aumento da população e à demanda global por alimentos, desempenha um papel importante na redução do desperdício de alimentos, no aumento da eficiência dos processos e na otimização dos custos de produção. A transformação causada pela indústria 4.0 está redefinindo radicalmente os processos industriais, ao possibilitar a interconexão e a colaboração em tempo real entre máquinas, sistemas e pessoas, promovendo a digitalização, a virtualização

e a descentralização das atividades produtivas, resultando em uma cadeia de valor integrada e flexível.

A adoção da indústria 4.0 requer uma abordagem holística, que transcenda as fronteiras tradicionais entre a indústria e a tecnologia, além de um ambiente favorável para a colaboração, a capacitação e a adaptação contínua. Diante disso, é fundamental compreender como as tecnologias da indústria 4.0 podem se integrar à economia circular, criando sinergias para enfrentar os desafios da produção agrícola moderna.

Schwab (2017) evidenciou algumas tecnologias-chave dessa indústria que impulsionaram o conceito do digital, como: Big Data e Analytics, Robôs Autônomos, Simulação Digital e Gêmeos Digitais, Internet das Coisas (IoT), Computação em Nuvem / Blockchain, Impressão 3D e Manufatura Aditiva, Realidade Virtual e Aumentada, Ciber Segurança Industrial, Integração de Sistemas e Interoperabilidade, Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina. O uso dessas tecnologias, somado às práticas circulares, como a reciclagem de nutrientes e a utilização de resíduos agrícolas, como biocombustíveis ou fertilizantes, promete um futuro sustentável para o agronegócio global (FAO, 2023).

Segundo a Ellen MacArthur Foundation (2013), a economia circular propõe um modelo econômico regenerativo e restaurativo que busca maximizar o valor dos recursos, minimizar os resíduos e os impactos ambientais e, ao mesmo tempo, promover a inovação. O conceito regenerativo da economia circular, para avançar na circularidade dentro do setor do agronegócio, enfatiza o uso da Internet das Coisas (IoT), juntamente com práticas de regeneração e a redução do consumo de recursos (Sharma et al., 2021).

A cadeia de suprimentos do agronegócio, alinhada à indústria 4.0, utilizando tecnologias digitais e conectividade para otimizar processos, propõe não apenas reduzir os custos e melhorar a eficiência, mas também alimentar práticas circulares (krstić *et al.*, 2022). Dessa forma, considerar soluções tecnológicas inovadoras da indústria 4.0 e sustentáveis torna-se imperativo, desde o produtor rural até a indústria agroalimentar, frente à crescente demanda por alimentos (Fernandez *et al.*, 2021). A indústria 4.0, representando a quarta revolução industrial, busca integrar tecnologias digitais avançadas aos processos produtivos, uma perspectiva reforçada pela implementação de tecnologias digitais baseadas no modelo ReSOLVE, especialmente na agricultura de precisão (Kagermann *et al.*, 2014; Mahroof *et al.*, 2021).

Diante das adaptações do agronegócio às mudanças climáticas e dos investimentos em tecnologias inovadoras, como as tecnologias habilitadoras (Kumar *et al.*, 2021), alguns desafios ainda são notáveis, incluindo a falta de infraestrutura, a capacitação dos usuários e a demanda elevada de investimentos em tecnologias (Mukherjee *et al.*, 2021). Nesse cenário, o setor adota

tecnologias habilitadoras, como conectividade, segurança cibernética, IoT, Blockchain e Big Data, que emergem como facilitadores proeminentes na perspectiva da economia circular (Sharma *et al.*, 2021). Contudo, persistem questões complexas, como a gestão de resíduos e sua destinação adequada, as quais representam desafios políticos e gerenciais, demandando a conscientização das partes interessadas (Kazancoglu *et al.*, 2022).

Esses desafios ressaltam a necessidade de adotar uma abordagem circular para a cadeia alimentar, focando na reutilização de resíduos gerados tanto como meio de fertilização como fonte de energia, conforme evidenciado por alguns estudos (Mukherjee *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2021; Kazancoglu *et al.*, 2022; Krstic *et al.*, 2022). Adicionalmente, à medida que a população cresce e a demanda por alimentos aumenta, torna-se direcionar soluções tecnológicas inovadoras e ambientalmente sustentáveis para a cadeia alimentar pós-colheita e para a indústria do agronegócio (Fernandez *et al.*, 2021). Em última análise, a digitalização da indústria, associada à economia circular, emerge como um caminho para atender às tendências futuras e promover uma abordagem sustentável em toda a cadeia produtiva do agronegócio.

1.1. PROBLEMA E LACUNA DE PESQUISA

Com a finalidade de conhecer o que já existe na literatura a respeito do agronegócio, realizou-se uma busca pelo tema em bases de dados científicas, como: Capes, Compendex, Emerald, Google Academic ProQuest, Scopus, Science Direct, Scielo, Taylor e Francis Wiley. A revisão sistemática da literatura permitiu identificar trabalhos que abordaram tanto as tecnologias da indústria 4.0 quanto as práticas da economia circular em empresas do agronegócio.

O resultado da análise da literatura identificou 15 pesquisas que abordaram tecnologias de Indústria 4.0 e economia circular no agronegócio, conforme as delimitações abordadas na metodologia, com publicações entre 2016 e 2024.

A tabela 1 apresentada oferece um panorama das pesquisas recentes que exploram a interseção entre tecnologia e sustentabilidade no agronegócio, abrangendo diferentes setores e metodologias. O estudo de Krstic *et al.* (2022) na Itália utiliza métodos AHP, com objetivo de hierarquizar as principais áreas de interesse da economia circular em termos de aplicação das tecnologias da indústria 4.0 das atividades logísticas no setor agroalimentar, concluíram que as áreas de interesse mais importantes são Reutilização, Remanufatura e Reciclagem, Gestão da Cadeia de Suprimentos e Gestão do Ciclo de Vida do Produto.

Enquanto Islan *et al.* (2022) na Austrália realizam uma revisão sistemática sobre modelos de negócios circulares e reciclagem para identificar componentes críticos do modelo de negócios com foco em reciclagem na economia circular e avaliar potenciais oportunidades de negócios e pesquisas na área, destacando a gestão eficiente de resíduos, uso de materiais reciclados, responsabilidade estendida do produtor e benefícios ambientais.

Na Turquia, Kazancoglu *et al.* (2022) abordam a gestão de resíduos alimentares no varejo e os desafios para a transição para a economia circular. Da Índia, Sharma *et al.* (2021) destacam o uso da tecnologia blockchain para circularidade nas cadeias de suprimentos agrícolas. Em Portugal, Fernandez *et al.* (2021) promovem a conscientização sobre soluções tecnológicas sustentáveis para a cadeia de suprimentos pós-colheita, e no Reino Unido, Mahroof *et al.* (2021) investigam o uso de drones como serviço para uma produção agrícola mais limpa e desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos sustentável. Esses estudos refletem um movimento global em direção à inovação responsável e práticas sustentáveis no agronegócio, indicando um caminho para o futuro do setor.

Segundo Fernandez *et al.* (2021), a cadeia do agronegócio está investindo na redução de desperdício de alimentos por meio de novas tecnologias, como embalagens inteligentes e ativas. Grandes empresas iniciam o uso das tecnologias habilitadoras para evoluir na gestão da economia circular, mas falta investimento, principalmente nas micro, pequenas e médias empresas do segmento agroindustrial. Nesta ótica, Sharma *et al.* (2021) abordam a utilização de uma estrutura de 12 Rs (Reducir, Reusar, Reciclar, Reparar, Renovar, Recuperar, Remanufaturar, Recondicionar, Reutilizar, Reprojetar, Remover, Reintegrar) – ações que visam melhorar a circularidade nas operações, por meio da conectividade contínua, fluxo de informação e tecnologia descentralizada.

Krstić *et al.* (2022) realizaram uma análise aprofundada sobre a implementação de estratégias de economia circular, focando em práticas como Reutilização, Remanufaturação, Reciclagem, Gestão da Cadeia de Suprimentos e Gestão do Ciclo de Vida do Produto. Os resultados do estudo ressaltam a importância dessas áreas, evidenciando-as como cruciais para o avanço da circularidade nas operações. Este achado sublinha o potencial significativo de tais práticas para otimizar o uso de recursos e minimizar o desperdício, contribuindo assim para um sistema de produção e consumo mais sustentável e eficiente.

No estudo de Mahroof *et al.* (2021), os desafios enfrentados pelo agronegócio na produção mais limpa foram examinados através das perspectivas da Indústria 4.0 e da economia circular. Os autores identificaram problemas críticos como desmatamento ilegal, ineficiências operacionais, imprecisão na semeadura, roubo, sabotagem, improdutividade dos trabalhadores,

riscos associados ao uso de pesticidas, questões de saúde e segurança do trabalhador, poluição, compactação do solo e doenças das plantas. A pesquisa concluiu que a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 pode mitigar esses desafios, melhorando significativamente o desempenho das empresas do setor e promovendo a evolução de produtos e processos. Essa conclusão se alinha com as descobertas de Krstić *et al.* (2022), que enfatizaram a importância da Reutilização, Remanufaturação, Reciclagem, Gestão da Cadeia de Suprimentos e Gestão do Ciclo de Vida do Produto e destacam a necessidade crítica de práticas sustentáveis e tecnologicamente avançadas para otimizar o uso de recursos e reduzir o desperdício, contribuindo para um sistema agrícola mais sustentável e eficiente.

Kumar *et al.* (2021) destacaram que a transição para modelos de negócios sustentáveis e tecnologicamente avançados no agronegócio enfrenta barreiras significativas, como a falta de apoio governamental e a ausência de políticas e protocolos adequados. Esses obstáculos são cruciais para a implementação efetiva da Indústria 4.0 e dos princípios da economia circular. A pesquisa sugere que a superação dessas barreiras é essencial para avaliar e melhorar o desempenho circular de produtos e processos. Além disso, os resultados do estudo fornecem análises para as partes interessadas da cadeia de abastecimento agrícola, orientando a implantação estratégica de tecnologias inovadoras e práticas circulares. Este entendimento complementa as conclusões dos estudos anteriores de Mahroof *et al.* (2021) e Krstić *et al.* (2022), que já haviam enfatizado a necessidade de superar desafios operacionais e promover práticas sustentáveis no agronegócio. Juntos, esses estudos formam um corpo coeso de conhecimento que ressalta a importância de abordar tanto as barreiras tecnológicas quanto as estruturais para avançar em direção a um futuro agrícola mais limpo, eficiente e sustentável.

Mukherjee *et al.* (2021) trataram a adoção de tecnologias da indústria 4.0 associada à evolução da circularidade e ao aumento da sustentabilidade, comparando a cadeia de suprimentos do agronegócio com a cadeia tradicional. As tecnologias aumentam o quociente de automação, a visibilidade e a integração em toda a rede que conecta pessoas, produtos e locais, reduzindo, assim, as complexidades da estrutura, evoluindo em rastreabilidade, manufatura sustentável e conceito de circularidade.

Até o momento, nenhum estudo no setor do agronegócio foi conduzido para comprovar de forma conclusiva a melhoria da circularidade de produtos e processos decorrentes da implementação de tecnologias da indústria 4.0. A confirmação desse efeito seria uma contribuição para a literatura científica, bem como uma orientação para a gestão organizacional, como forma de aprimorar seu desempenho. Como resultado, busca-se resposta para a implementação da economia circular para trazer benefícios significativos à saúde financeira e

sustentável da empresa, se é possível melhorar seu desempenho, reduzir custos e aumentar a eficiência do uso de recursos. Além disso, buscar a promoção da marca como uma empresa ambientalmente correta é capaz de atrair novos clientes e garantir contratos a longo prazo. Essa mudança de paradigma para um modelo sustentável pode gerar impactos positivos em múltiplas dimensões.

Krstić *et al.* (2022) evidenciaram que os resultados obtidos pelas áreas de reutilização, remanufatura e reciclagem, juntamente com a gestão da cadeia de suprimentos e a gestão de produtos ao fim da vida útil, são os principais pilares da economia circular para o setor do agronegócio e devem receber atenção nos planos e ações futuras para promover a sustentabilidade do sistema. Mahroof *et al.* (2021) pesquisaram sobre a utilização das tecnologias habilitadoras e do modelo ReSOLVE da economia circular para eliminar os desperdícios e minimizar a poluição. Com isso, conforme os autores, é possível reduzir as doenças e a poluição das plantas e melhorar o desafio de saúde, a segurança das pessoas e a colheita de produtos, não só de forma rentável, mas também saudável. A literatura disponível ainda apresenta uma lacuna de dados em certas áreas específicas do setor do agronegócio que é o pós-colheita, o que sugere a existência de uma grande oportunidade para a adoção de práticas relacionadas à economia circular.

Mariatti *et al.* (2021) apontam que, apesar de não haver evidências de pesquisas realizadas no setor de pós-colheita sobre a evolução de circularidade por meio da adoção de tecnologias habilitadoras, o setor do agronegócio é responsável por um impacto relevante ao meio ambiente. Kumar *et al.* (2021) discorrem sobre as principais barreiras que impedem a implantação das tecnologias da indústria 4.0 e da economia circular. Adicionalmente, Mukherjee *et al.* (2021) discutem os proveitos associados à implementação da tecnologia de Blockchain, apoando a relevância de se persistir na sustentabilidade e proporcionar conhecimentos fundamentais aos especialistas, de modo a capacitá-los a adotar medidas apropriadas quanto à incorporação de novas tecnologias, conforme apresentado nos estudos dos autores.

No âmbito da presente investigação desta pesquisa, constatou-se que é preciso estudar a adoção de tecnologias habilitadoras se poderá ter um impacto significativo na evolução da circularidade dos processos e produtos. Além disso, verificou-se que essa melhoria está estreitamente relacionada com a proteção e a sustentabilidade, proporcionando, assim, vantagens para a sociedade como um todo. Em suma, a partir do que apontam essas pesquisas, a adoção das tecnologias da indústria 4.0 no agronegócio aumenta a eficiência e a produtividade do setor, o que é fundamental para atender à crescente demanda por alimentos e garantir a

competitividade de mercado. Após uma análise minuciosa dos estudos relacionados ao tema, embora haja pesquisas que exploram as interseções entre tecnologias da indústria 4.0 e práticas de economia circular, o foco principal desses estudos se concentra no contexto da pós-colheita do agronegócio brasileiro.

Diante disso, há uma lacuna na literatura: a ausência de um framework específico que detalhe como as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser implementadas para promover práticas de economia circular no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro. A existência de um framework e pesquisas poderá contribuir para compreensão abrangente e específica sobre a eficácia dessas tecnologias na promoção de práticas circulares.

A carência de evidências empíricas consolida a necessidade de uma pesquisa aprofundada e direcionada que explore as interações entre as tecnologias da Indústria 4.0 e a economia circular no contexto agrícola brasileiro. Este estudo deve se concentrar não apenas nos efeitos gerais da adoção dessas tecnologias, mas também nas condições específicas e nos mecanismos através dos quais ela pode impulsionar práticas circulares dentro do agronegócio. A etapa de monitoramento carece particularmente de uma análise detalhada, visto que há uma escassez de estudos que examinem as consequências e os resultados da implementação de tecnologias da Indústria 4.0 sobre as práticas de economia circular no segmento de pós-colheita.

Além disso, as empresas que estão ou pretendem adotar essas práticas têm interesse em observar e avaliar as estratégias implementadas por outras empresas do setor. Portanto, realizar pesquisas que abordem apropriadamente os métodos de monitoramento e avaliação dessas práticas, com o objetivo de fornecer às empresas interpretações que melhorem sua sustentabilidade e eficiência ambiental, especialmente no contexto brasileiro (Di Maria *et al.*, 2022).

Com base nessas considerações, desenvolveu-se a questão de pesquisa para orientar este estudo:

- (i) Como propor um framework para implantação de tecnologias da indústria 4.0 que promova a economia circular no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro?

1.2. OBJETIVOS

Com o propósito de abordar as questões aqui propostas, delineou-se como objetivos desta pesquisa os expostos abaixo.

1.2.1. Objetivo geral

Como propor um framework para implantação de tecnologias da indústria 4.0 que promova a economia circular no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar na literatura as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 que relacionam com a economia circular no agronegócio;
- Encontrar na literatura e por meio de análises, a existência de relações entre adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e a promoção de economia circular em empresas do agronegócio brasileiro;
- Avaliar as relações de tecnologias da indústria 4.0 e as práticas de economia circular no agronegócio brasileiro.
- Elaborar um fluxo de interação das tecnologias da indústria 4.0 e práticas da economia circular nas fases de implantação no agronegócio.

1.3. JUSTIFICATIVA

A justificativa teórica, conforme o estudo de Mahroof *et al.* (2021), destaca a importância da adoção de práticas circulares e tecnologias da Indústria 4.0 nas cadeias de suprimentos agrícolas para garantir uma produção de alimentos sustentável. A integração de soluções inovadoras não apenas beneficiará a indústria, mas também contribuirá para o avanço do conhecimento científico.

A justificativa para a aplicação prática do setor de pós-colheita, de acordo com a pesquisa da Associação Brasileira do Agronegócio - ABAG (2023), a competitividade e a inovação no agronegócio brasileiro são impulsionadas contribuindo significativamente para a projeção global do setor. Além disso, a falta de infraestrutura ideal é identificada com um obstáculo para a inovação tecnológica, destacando a necessidade de investimentos em estruturas destinadas ao recebimento, à limpeza e à armazenagem de *commodities* agrícolas.

A justificativa para à sociedade, onde o alinhamento dos avanços tecnológicos com os princípios circulares, conforme destacado por Mahroof *et al.* (2021), não apenas traz benefícios

para a indústria, mas também tem implicações para o desenvolvimento sustentável e o bem-estar social. Além disso, a evolução da produção agrícola no país em comparação com os investimentos reforça a necessidade de planejamento para modernização das estruturas e superação dos desafios enfrentados pelo setor do agronegócio.

Com base na revisão literária realizada, não foram identificados estudos que abordem de forma abrangente e específica a criação de um framework que utilize as tecnologias da Indústria 4.0 para promover práticas de economia circular no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro. O ineditismo desta pesquisa reside justamente na proposição e desenvolvimento deste framework, que conecta as tecnologias da Indústria 4.0 com as diretrizes da economia circular e oferece uma abordagem sistemática e empírica fundamentada para implementação. Ao explorar essa interseção, a tese traz sua contribuição, fornecendo sugestões e ferramentas práticas que podem transformar a sustentabilidade no agronegócio brasileiro.

O setor do agronegócio movimenta a economia brasileira — sua participação alcançou cerca de 24,8% do PIB em 2022, o que representa 19,35% da população envolvida com o mercado de trabalho nesse setor no país (CEPEA, 2022). O índice de exportações do setor, nesse sentido, é bastante expressivo, conforme é possível observar na Figura 1, que apresenta dados do Comércio Exterior Brasileiro, com seus principais destinos, Estados exportadores, origem das importações e Estado importador.

Figura 1 - Comércio Exterior Brasileiro – Agronegócio 2024

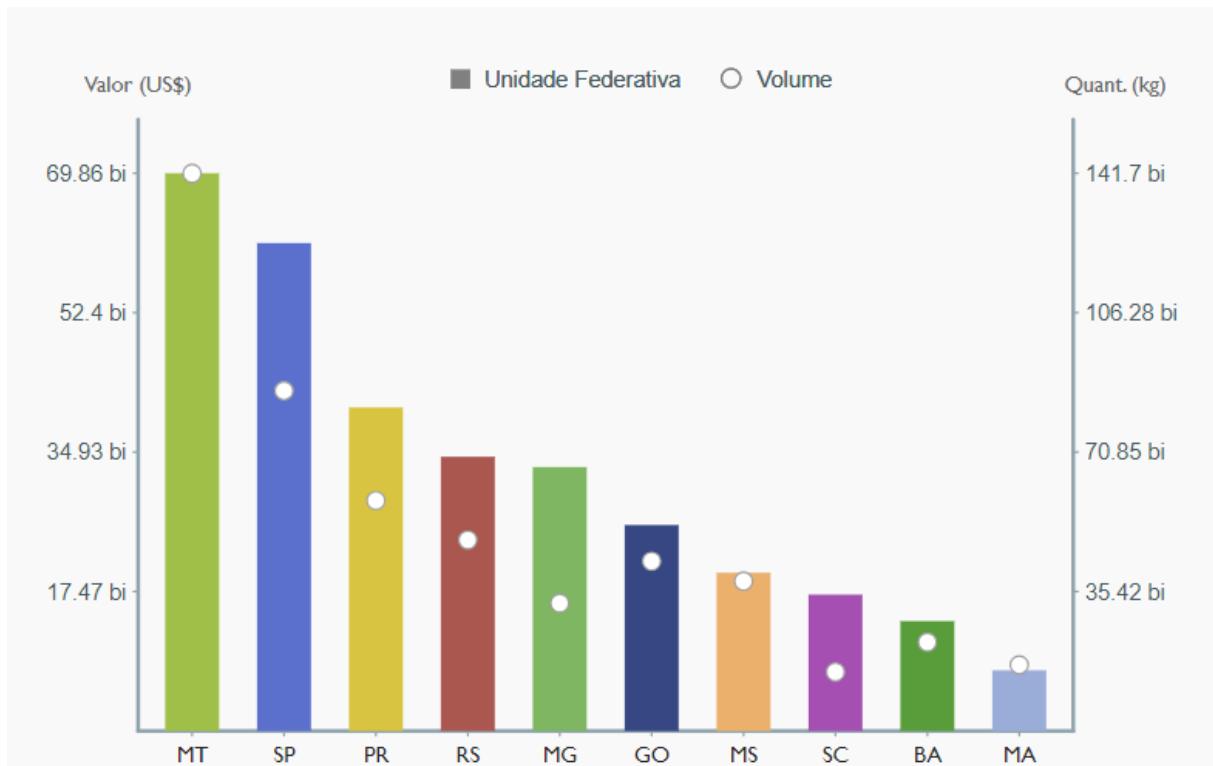


Fonte: Observatório Agropecuário Inmet, 2024

As exportações do agronegócio somaram US\$ 178,2 bilhões em 2023, obtendo uma alta de 5,26% em relação ao ano anterior. De acordo com a Secretaria de Comércio e Relações Internacionais (SCRI), do Ministério da Agricultura e Pecuária, as vendas externas do agronegócio representaram 47,6% do total exportado pelo Brasil em 2022 (MAPA, 2023). A

seguir, a Figura 2 apresenta os principais estados exportadores do agronegócio brasileiro em 2022.

Figura 2 - Principais estados exportadores – Agronegócio 2022



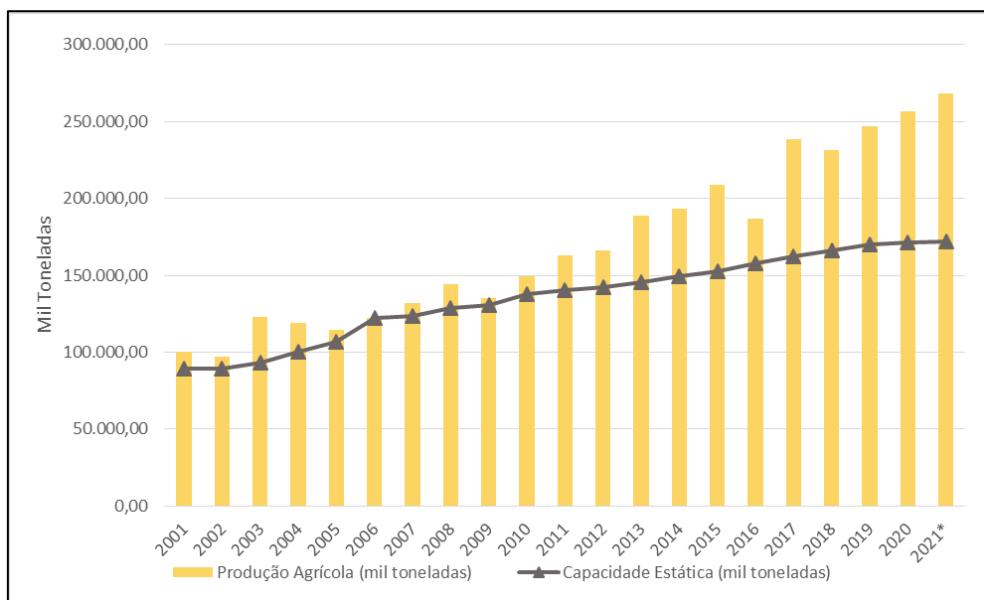
Fonte: Observatório Agropecuário Inmet, 2023

A Figura 2 oferece uma leitura acerca da dinâmica do agronegócio brasileiro em 2023, destacando os principais estados exportadores e suas contribuições para o comércio internacional. Em primeiro plano, o Estado de Mato Grosso (MT) se destaca como líder incontestável, registrando exportações expressivas, totalizando 69,86 bilhões de dólares norte-americanos e uma impressionante quantidade de 141,7 bilhões de quilogramas de produtos, predominantemente compostos por *commodities* do agronegócio.

Essa cifra robusta sublinha não apenas a escala imponente da produção agrícola mato-grossense, mas também seu papel preponderante nas exportações nacionais. Atrás do MT, observamos a presença de outros estados nesse cenário, como São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Bahia e Maranhão, cada um contribuindo para a projeção global do agronegócio brasileiro, evidenciando a distribuição estratégica e a importância relativa de cada Estado no contexto das exportações do setor agrícola (INMETRO, 2023).

Destacando os principais obstáculos para a inovação tecnológica, verifica-se que 85% deles estão relacionados à carência de uma infraestrutura ideal (CONAB, 2021). Diante desse cenário desafiador, o setor de pós-colheita emerge como um ponto focal, revelando um déficit significativo nos investimentos em estruturas destinadas ao recebimento, à limpeza e à armazenagem de *commodities* agrícolas. Esse déficit torna-se evidente quando observamos o gráfico subsequente, no qual a produção agrícola no país cresce a uma taxa superior aos investimentos, como apresentado pela evolução de 223,19% na produção entre 2001 e 2021, contrastada por um aumento de capacidade de apenas 92,48% (CONAB, 2021); que é um elemento do pós-colheita.

Figura 3 - Evolução da capacidade estática de armazenagem e a produção agrícola – 2001-2021



Fonte: Conab, 2021

A figura 3 proporciona uma análise da evolução da capacidade estática de armazenagem em paralelo com o crescimento exponencial da produção agrícola no Brasil, abrangendo o período de 2001 a 2021. É possível observar, a partir desses dados, uma transformação no cenário agrícola do país em 2001, a produção agrícola era de aproximadamente 100.000 mil toneladas; e em 2021, esse número atingiu uma marca impressionante, superando 250.000 mil toneladas.

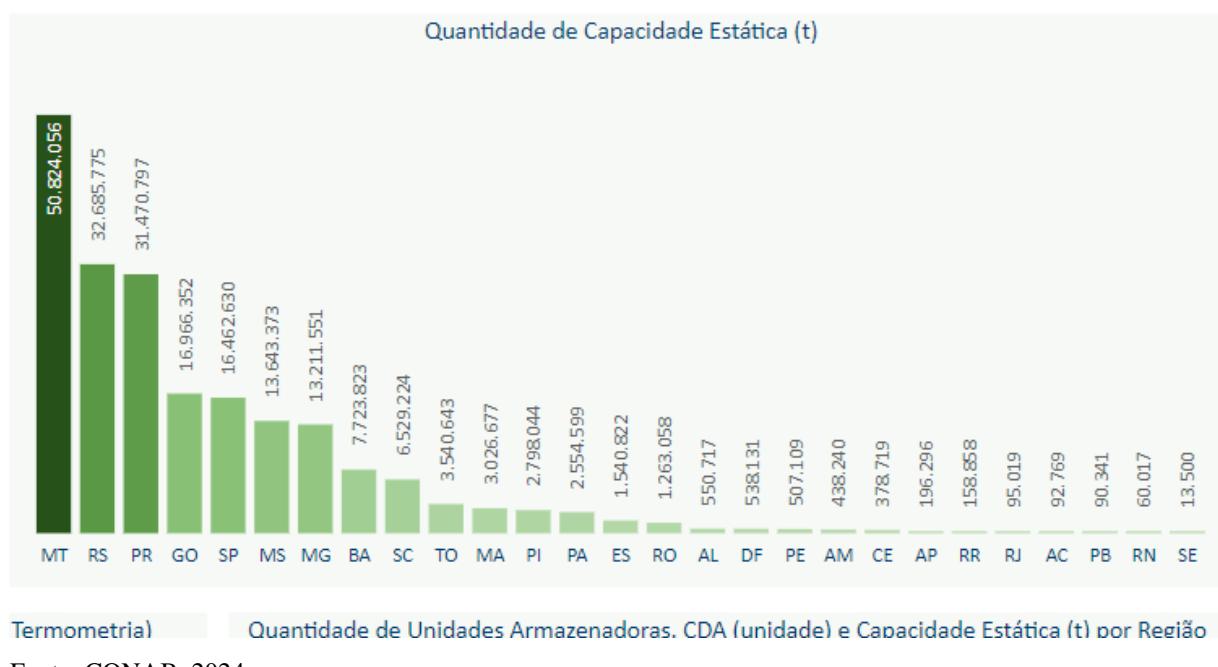
Em paralelo com esse crescimento vigoroso, da infraestrutura, a capacidade estática de armazenagem das estruturas experimentou uma evolução inferior à produção. Inicialmente, em 2001, essa capacidade estática de armazenagem era inferior a 100.000 mil toneladas; em 2021, elevou-se, ultrapassando a marca de 160.000 mil toneladas. Essa disparidade entre o aumento

da produção agrícola e o crescimento da capacidade de armazenagem destaca um desafio no setor de pós-colheita, ressaltando a necessidade de investimentos e estratégias eficazes para garantir a eficiência e a sustentabilidade da cadeia de suprimentos agrícolas no Brasil (CONAB, 2021).

Conforme indicado pela Conab (2024), o Brasil se destaca como protagonista tanto no cenário nacional quanto internacional da produção agrícola. A tabela 2 ilustra, o crescimento da capacidade de armazenamento, dando um salto de 160.000 mil toneladas em 2021 para mais de 207.000 mil toneladas em 2024. No entanto, ainda há uma perspectiva de déficit de infraestrutura para produtos cruciais, como arroz, milho e soja, que se projeta a ultrapassar o déficit atual.

É fundamental destacar que, nesta década, essa expansão da produção agrícola será contrabalançada por condições precárias no recebimento, beneficiamento e armazenamento desses produtos. Esse descompasso impõe custos substanciais, leva ao desperdício de alimentos, compromete a qualidade dos produtos e gera impactos significativos nos âmbitos ambiental, econômico e social. Nesse contexto, torna-se imperativo enfrentar e superar os desafios estruturais da cadeia de pós-colheita brasileira para assegurar a gestão sustentável desses recursos fundamentais (CONAB, 2024).

Gráfico 1 - Capacidade Estática Brasileira



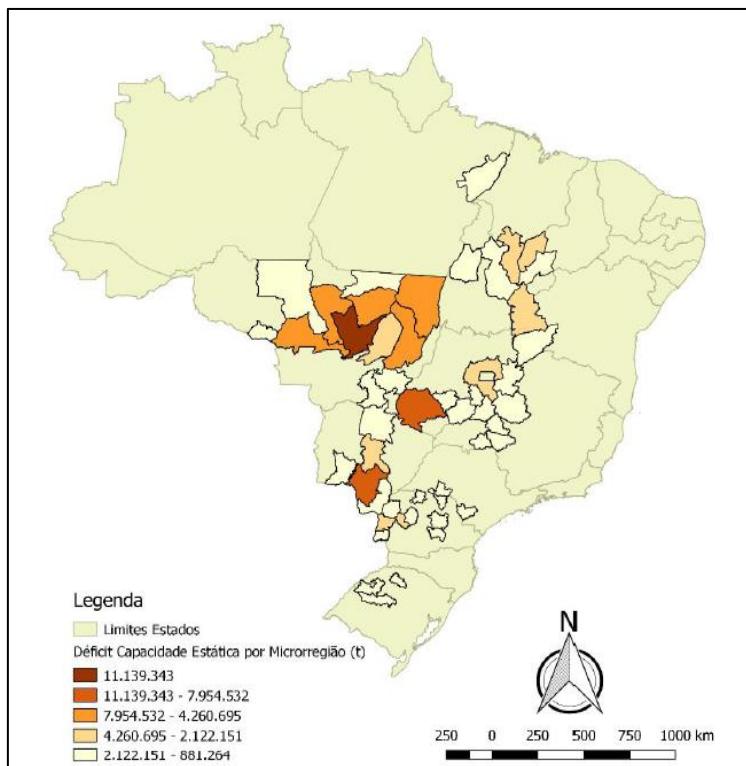
Fonte: CONAB, 2024

A capacidade estática do Brasil vem crescendo, com projeção de investimento e continuará crescendo.

A Figura 4 apresenta uma análise da distribuição do *déficit* de estruturas de armazenagem para as safras brasileiras, com foco nas microrregiões. Revela-se que os déficits mais significativos estão localizados em regiões que demandam uma ação para o planejamento e investimento no aumento da capacidade de armazenagem. Especificamente, microrregiões no estado de Mato Grosso se destacam, com um *déficit* notório na infraestrutura de armazenagem, atingindo um volume de 11.139.343 toneladas.

A representação gráfica, por meio do uso de cores, evidencia visualmente a extensão desses *déficits* — e, neles, as microrregiões do MT se destacam como afetadas. Na sequência, as áreas com maiores *déficits* incluem regiões do Mato Grosso do Sul (MS), de Goiás (GO), de Minas Gerais (MG), do Paraná (PR), da Bahia (BA), do Piauí (PI), de Tocantins (TO) e do Rio Grande do Sul (RS). A figura proporciona uma compreensão clara acerca da disparidade regional na capacidade de recebimento das safras e destaca áreas específicas que demandam intervenções estratégicas para mitigar o *déficit* de infraestrutura e fortalecer a resiliência da cadeia de suprimentos agrícolas em nível nacional (CONAB, 2021).

Figura 4 - Déficit de capacidade estática por Microrregião Brasileira



Fonte: CONAB, 2021

O programa de incentivo e investimento na área é de extrema importância, destacando-se, notadamente, o Programa para a Construção e Ampliação de Armazéns. Planos como esses desempenham seu papel ao abordarem os desafios estruturais identificados na cadeia de suprimentos agrícolas. Ao fornecerem incentivos financeiros para a construção e expansão de armazéns, essas iniciativas não apenas respondem ao *déficit* de capacidade estática destacado na Figura 4, como também promovem a eficiência operacional, reduzem o desperdício de alimentos e fortalecem a segurança alimentar da cadeia agrícola diante do crescimento projetado na produção. Portanto, o apoio contínuo e o desenvolvimento aprimorado desses programas são essenciais para garantir uma infraestrutura robusta, que atenda às demandas crescentes do agronegócio brasileiro (BNDES, 2024).

Contudo, é preciso planejamento para evoluir a capacidade estática deficitária, superando a mão de obra não qualificada, a dificuldade de acesso às linhas de financiamento, a burocracia, as restrições e a demanda de linhas de financiamento novas para a modernização das estruturas, a partir de estudos de viabilidade, novas propostas construtivas e tecnologia, reavaliação da depreciação, de problemas fiscais, assim como da baixa atratividade e rentabilidade para o processamento da produção brasileira. A seguir, o Quadro 1 apresenta o histórico do recurso investido pelo Programa para a Construção e Ampliação de Armazéns.

Quadro 1 - Programa para a Construção e Ampliação de Armazéns – PCA

Safra	Juros	Recursos de Investimentos		
		Programado (Milhões de R\$)	Aplicado (milhões de R\$)	% Aplicado
2013/2014	4%	3500	2760	70
2014/2015	4%	3500	2459	70
2015/2016	8%	2000	914	46
2016/2017	9%	1400	601	43
2017/2018	7%	1600	1008	63
2018/2019	6,0% - 6,5%	2150	1120	52
2019/2020	6,0% - t,0%	1815	1282	71
2020/2021*	5,0% - 6,0%	1820	1761	91

Fonte: Bacen, 2021

O Quadro 1, que apresenta dados do Programa para a Construção e Ampliação de Armazéns (PCA), oferece uma visão da evolução da taxa de juros associada ao programa entre os anos de 2013 e 2021. Destaca-se a variação dessas taxas, revelando a dinâmica do ambiente

financeiro e as estratégias de adaptação do PCA para proporcionar condições atrativas aos beneficiários (BACEN, 2021).

Um aspecto relevante é a discrepância entre o valor programado e o montante efetivamente aplicado, destacando-se a complexidade e os desafios enfrentados na implementação do PCA. Assim, a taxa de aplicação apresenta uma tendência de aumento, partindo de 43% em 2016/2017 para um patamar de 91% em 2020/2021, porém o valor total programado reduziu, mostrando o impacto no percentual realizado maior neste último período (BACEN, 2021).

As exportações do agronegócio brasileiro, em 2023, quando comparadas a 2022, apresentam evolução, motivo principal da supersafra de soja ocorrida em 2023 e da falta de infraestrutura para armazenar e processar todo esse volume recebido, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Exportação do Agronegócio Brasileiro em Toneladas

Commodity	maio/22	maio/23
Soja	10.640.471,00	15.308.178,00
Milho	1.088.472,00	437.343,00
Trigo	107.989,00	79.672,00
Algodão	81.622,00	69.343,00
Café	142.466,00	152.655,00
Açúcar	1.564.380,00	1.898.263,00
Arroz (base casca)	39.661,00	197.615,00
Carne Bovina	152.356,00	178.858,00
Carne Frango	399.296,00	433.588,00
Carne Suína	79.786,00	90.278,00
Total	14.296.499,00	18.845.793,00

Fonte dos dados: Secex – Elaborado COGO Inteligência em Agronegócio, 2022.

O Quadro 2, que abrange a exportação do agronegócio brasileiro em toneladas, fornece informações sobre as tendências recentes da evolução de exportações de soja de 2022 para 2023, evidenciando uma demanda crescente por investimentos em tecnologias inovadoras e infraestruturas de armazenagem. Esse aumento significativo nas exportações de grãos de soja já impactou as safras de trigo e milho — safra de inverno de 2023 —, como demonstram os dados disponíveis até maio de 2023. Esse panorama ressalta a necessidade de adaptação e

investimentos estratégicos na capacidade de armazenamento e tecnologias aplicadas à pós-colheita, a fim de garantir a eficiência e a competitividade do agronegócio brasileiro diante do contínuo crescimento nas exportações (COGO, 2022).

A implementação de tecnologias da Indústria 4.0 no setor agrícola tem demonstrado um impacto positivo, conforme indicado por dados da CNA, que mostram um aumento de 56,9% na produtividade da soja em 2020 devido à agricultura de precisão; é uma abordagem de gestão que incorpora várias tecnologias para monitorar e otimizar a aplicação de insumos agrícolas, com o objetivo de aumentar a produtividade, melhorar a qualidade das colheitas e promover a sustentabilidade ambiental (MOLIN et al., 2021). Um relatório da McKinsey também sugere que a integração de tecnologias digitais pode resultar em uma diminuição de custos de produção entre 10% e 25%, além de aprimorar a eficiência, sustentabilidade e segurança alimentar em escala global. A adoção dessas tecnologias é, portanto, uma evolução natural e benéfica para o agronegócio (CNA, 2020).

Além de otimizar o fluxo de produtos na cadeia de suprimentos, as tecnologias da Indústria 4.0 oferecem benefícios como a redução de resíduos, a diminuição da poluição ambiental e o aumento da eficiência operacional. Esses avanços contribuem significativamente para a sustentabilidade do setor, permitindo uma gestão mais inteligente dos recursos e um menor impacto ecológico, alinhando-se assim com as metas globais de desenvolvimento sustentável (CNA, 2020).

O trabalho de Mahroof *et al.* (2021) oferece uma perspectiva sobre a adoção de práticas circulares e tecnologias da Indústria 4.0, justificando a necessidade de aprofundamento dos estudos nessa área ao abordar a necessidade de integrar soluções inovadoras nas cadeias de suprimentos agrícolas para garantir uma produção de alimentos sustentável em todos os aspectos. O presente estudo ressalta o valor das práticas circulares e das tecnologias da Indústria 4.0, que transcendem os limites industriais para beneficiar tanto a sociedade quanto o campo científico. Estudar se a adoção dessas práticas e tecnologias facilita um fluxo mais eficiente de produtos na cadeia e permite previsões mais precisas, graças ao emprego de tecnologias. Essa abordagem não só otimiza a logística e reduz o desperdício, mas também promove a pesquisa científica ao fornecer dados para o desenvolvimento de soluções, contribui para o bem-estar social e o avanço do conhecimento.

Essa abordagem integrada, que alinha os avanços tecnológicos aos princípios circulares, não apenas beneficia a indústria, mas também tem implicações para o desenvolvimento sustentável, alinhando-se aos ideais da sociedade e promovendo avanços científicos notáveis (Mahroof *et al.*, 2021).

Uma pesquisa realizada pela ABAG (2023), com 100 respondentes do setor, mostrou que a competitividade e a inovação no agronegócio brasileiro são impulsionadas pela adoção de tecnologias da indústria 4.0. A pesquisa destacou que a inovação está voltada ao aprimoramento das ferramentas de gestão e governança, por meio da utilização de tecnologias-chave, como Big Data & Analytics, computação em nuvem, Internet das Coisas, cibersegurança e integração de sistemas, conforme destacado anteriormente. Essas tendências demonstram a crescente importância de soluções tecnológicas avançadas para impulsionar a eficiência e a competitividade do agronegócio brasileiro.

1.4. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Conforme apontado por Marconi e Lakatos (2010), a delimitação da pesquisa desempenha um papel fundamental no trabalho científico, pois estabelece os limites da investigação. Essa delimitação pode ser realizada com base no tema, em sua abrangência ou nos fatores que possam restringir o escopo da pesquisa. Pensando nisso, a delimitação deste estudo encontra-se representada na Figura 5.

Figura 5 - Delimitação da pesquisa



Fonte: Autora.

A figura ilustra de maneira abrangente as quatro etapas fundamentais desta pesquisa relacionadas ao tema proposto de pós-colheita: abrindo o pós-colheita em suprimentos processamento, gestão de resíduos sólidos e logística na cadeia de pós-colheita do agronegócio

brasileiro. Em uma visualização clara e integrada, as três imagens acopladas à figura representam aspectos centrais da pesquisa: a cadeia do agronegócio, as práticas da economia circular e as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0. Essa representação gráfica proporciona uma visão holística das interconexões entre esses elementos, destacando a interdependência inerentes ao contexto analisado, ao mesmo tempo em que oferece uma base visual para a compreensão dos conceitos e variáveis envolvidos no estudo, e serve como um mapa conceitual que guia o leitor através das complexidades do sistema de pós-colheita, enfatizando a sinergia entre sustentabilidade e inovação tecnológica; sendo utilizado essa sequência para abordagem dos autores da revisão sistemática da literatura.

O setor do agronegócio brasileiro possui uma cadeia reconhecida mundialmente como um dos principais centros de alimentos do mundo, devido à sua extensa área de terras agricultáveis, ao seu parque industrial e à diversidade de culturas agrícolas, abrangendo desde a produção de *commodities* agrícolas até a agroindústria processadora de alimentos. Ademais, o país tem uma base sólida de recursos naturais, terras agricultáveis e um clima favorável que contribuem para o crescimento do setor. Atualmente, a cadeia do agronegócio representa cerca de 21% do PIB brasileiro e emprega diretamente cerca de 16% da força de trabalho do país, sendo evidente sua importância tanto para o mercado interno quanto para o mercado global de alimentos (USDA Brazil, 2022).

O relatório mais recente do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) aponta um cenário favorável para o crescimento contínuo do agronegócio brasileiro, ao indicar que o Brasil tem se consolidado como um importante *player* no mercado global de *commodities* agrícolas, com projeções de aumento na produção e nas exportações. Além disso, o relatório destaca que o Brasil tem investido em tecnologia agrícola avançada e em práticas de produção sustentáveis, fatores que, juntamente com a crescente demanda global por alimentos, posicionam o agronegócio brasileiro em uma trajetória de expansão e fortalecimento no mercado internacional (USDA Brazil, 2022).

O Brasil tem se destacado no cenário global como um dos principais exportadores de produtos do agronegócio, sobretudo *commodities*. A soja, em particular, tem tido uma exportação das principais, consolidando o país como um gigante na venda deste insumo essencial, amplamente utilizado tanto na alimentação animal quanto na produção de óleo de soja. Além da soja, o Brasil é reconhecido por sua capacidade de fornecer uma variedade de outros produtos agrícolas de importância mundial, como milho, açúcar, café, algodão, carnes, óleo de palma e laranja. Essa diversidade de exportações reforça a posição do país como um player influente no mercado global de alimentos e recursos agrícolas (AMIS, 2023).

Diante disso, torna-se importante abordar a inserção estratégica das tecnologias da indústria 4.0 e os princípios da economia circular nesse processo. A relevância global dessa cadeia produtiva, apesar de sua importância, é acompanhada por desafios ambientais consideráveis. Como ressaltado por Gomes (2019), a extensa área de cultivo e a necessidade de insumos, como fertilizantes e agrotóxicos, são fatores que contribuem para impactos ambientais significativos. Nesse contexto, a pesquisa visa explorar, minuciosamente, a integração dessas tecnologias e princípios em etapas cruciais da cadeia de suprimentos, recebimento, beneficiamento e armazenagem, gestão de resíduos e logística, dentro do setor de pós-colheita.

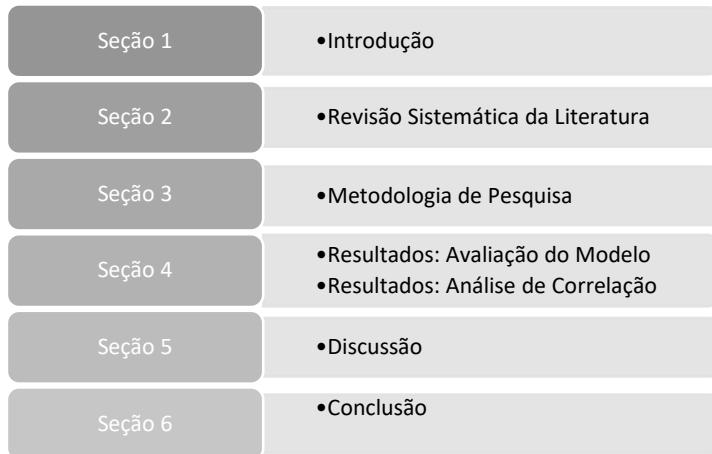
Destaca-se que as empresas e instituições, com presença tanto nacional quanto internacional, desempenham um papel central nessa investigação. Conforme enfatizado por Christ *et al.* (2022), essas entidades enfrentam pressões para adotar tecnologias habilitadoras e incorporar os conceitos da economia circular. Como resultado, comprometem-se, de forma particular, a adotar práticas de digitalização e cumprir regulamentações ambientais, objetivando não apenas aprimorar sua eficiência interna, mas também alinhar-se às expectativas do mercado global e expandir suas oportunidades de exportação.

Neste contexto, a abordagem holística adotada pelo estudo visa elucidar as oportunidades e desafios que o agronegócio brasileiro enfrenta em sua jornada rumo à sustentabilidade e à digitalização, mantendo sua relevância e posição estratégica no mercado internacional. Este caminho servirá para garantir que o setor continue a prosperar, adaptando-se às tendências globais e contribuindo para um futuro mais verde e tecnologicamente avançado.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, dividiu-se a pesquisa em seis seções, iniciando pela introdução, seção atual. A Figura 6 ilustra a estrutura desta pesquisa, proporcionando uma visão geral da organização das seções.

Figura 6 - Estrutura do Trabalho



Fonte: Autora.

Na seção 2, é apresentada uma revisão sistemática da literatura que busca identificar a relação entre a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas de economia circular no setor do agronegócio. Na seção 3, é detalhada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, incluindo os procedimentos adotados e as explicações das técnicas estatísticas empregadas. A seção 4 contém os resultados calculados e a análise dos dados apresentados. As seções de discussão e conclusão (5 e 6) serão apresentados posteriormente, portanto não serão abordados nesse momento.

2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Nesta seção, será apresentada a revisão sistemática da literatura a respeito dos temas que fundamentam o trabalho separados por setor dentro do pós-colheita do agronegócio: destacando sua relevância econômica e os desafios contemporâneos. Em um segundo momento, as Tecnologias da Indústria 4.0, explorando como podem ser aplicadas para modernizar o setor. Por fim, a Economia Circular e como sua implementação pode promover a sustentabilidade e a eficiência nos processos empresariais do agronegócio.

Este estudo realizou uma revisão sistemática da literatura para examinar estudos que exploram a relação entre as tecnologias da indústria 4.0 e as práticas da economia circular, utilizando as palavras chaves “Economia Circular”, “Indústria 4.0”, “Pós-colheita”, “Agronegócio”, em português e inglês, desde 2019. Foram encontrados 14 artigos e elencado uma tese, a maioria abordou o termo de circularidade para avaliar a adoção das práticas circulares, por meio de experimentos ou estudos exploratórios. Os artigos foram analisados e segregados dentro da cadeia do agronegócio, conforme tabela 2.

Tabela 1 - Relação de artigos

Título	Ano	Setor	Metodologia	País pesquisa	Citação
Innovative technologies for organizing a balanced development of the business ecosystem (in the example of agriculture in Ukraine)	2023	Agronegócio / pós-colheita	Abordagem analítica e exploratória, com desenvolvimento de modelos conceituais	Ucrânia	(SKOROBOGATOV A et al., 2023 *a)
Industry 4.0 and the Circular Economy: Integration Opportunities Generated by Startups	2023	Agronegócio / pós-colheita	"Revisão sistemática da literatura, revisões analíticas de	Ucrânia	(SKOROBOGATOV A et al., 2023 *b)
Industry 4.0 and the Circular Economy: Integration Opportunities Generated by Startups	2022	Agronegócio / pós-colheita	Revisão sistemática da literatura e validação empírica com 45 startups de foodtech	Brasil	(SILVA et al., 2022)
Arquitetura integrada para promover a economia circular na agricultura 4.0	2022	Agricultura	Revisão sistemática da literatura e método Delphi	Brasil	(VARELLA, 2022)
Logistics 4.0 toward circular economy in the agri-food sector	2022	Logística Agronegócio	Métodos AHP e COBRA	Itália	(KRSTIĆ et al., 2022)
Recycling Perspectives of Circular Business Models: A Review	2022	Gestão de Resíduos Agronegócio	Revisão sistemática da literatura	Australia	(ISLAM et al., 2022)
Food waste management in the retail sector: challenges that hinder transition to circular economy	2022	Gestão de Resíduos Agronegócio	Revisão da literatura e Modelagem Estrutural Interpretativa (ISM)	Turquia	(KAZANCOGLU et al., 2022)
Leveraging blockchain technology for circularity in agricultural supply chains: evidence from a fast-growing economy	2021	Suprimentos Agronegócio	Revisão Sistemática da Literatura, modelagem estrutural interpretativa integrada (ISM-DEMATEL)	Índia	(SHARMA et al., 2021).
Fostering Awareness on Environmentally Sustainable Technological Solutions for the Post-Harvest Food Supply Chain	2021	Pós-colheita do Agronegócio	Revisão sistemática da literatura	Portugal	(FERNANDEZ et al., 2021).
Drone as a Service (DaaS) in promoting cleaner agricultural production and Circular Economy for ethical Sustainable Supply Chain development	2021	Suprimentos Agronegócio	Modelagem estrutural interpretativa (ISM)	Reino Unido	(MAHROOF et al., 2021).
Process intensification technologies for the recovery of valuable compounds from cocoa by-products	2021	Gestão de Resíduos Agronegócio	Revisão da literatura, mais modelo híbrido de MCDM que combina o método Analytical Hierarchy Proces (AHP)	Itália	(MARIATTI et al., 2021)
To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP	2021	Suprimentos Agronegócio	Modelagem Matemática, Delphi e ISM	Índia	(KUMAR et al., 2021).
Application of blockchain technology for sustainability development in agricultural supply chain: justification framework	2021	Suprimentos Agronegócio	Processo hierárquico analítico (AHP)	Índia	(MUKHERJEE et al., 2021).
Big data for agri-food 4.0: Application to sustainability management for by-products supply chain	2019	Gestão Resíduos Agronegócio	Estudo de caso	França	(BELAUD et al., 2019)
Biomaterials from the value-added food wastes	2019	Gestão Resíduos Agronegócio	Revisão da literatura	Cingapura	(CHAKRAPANI et al., 2022)

Fonte: Autora.

2.1. AGRONEGÓCIO

O setor do agronegócio é importante para a economia brasileira, representando cerca de 24,1% do Produto Interno Bruto (PIB) do país (CEPEA, 2023). Dentro do setor, destacam-se os suprimentos da indústria de insumos agrícolas, responsável por fornecer matérias para produção (MAPA, 2023).

O agronegócio brasileiro, embora confrontado com os desafios da modernização agrícola, encontra na digitalização da pós-colheita uma oportunidade. Esta transformação não só facilita a gestão eficiente dos recursos e a otimização dos processos, mas também promove a concentração de capital. Benefícios adicionais incluem a melhoria da rastreabilidade dos produtos, a redução de perdas e desperdícios, e a capacidade de responder rapidamente às demandas do mercado, fortalecendo assim a posição competitiva do Brasil no cenário global do agronegócio (Medina *et al.*, 2021).

Com o agronegócio contribuindo para o PIB, a aplicação do aprendizado de máquina proporciona uma abordagem precisa, reduzindo a dependência da mão de obra humana e resultando em uma produção de qualidade, para impulsionar a sustentabilidade e a produtividade no agronegócio brasileiro (Seleiman *et al.*, 2020).

Segundo o relatório *Perspectivas Agrícolas 2021-2030*, da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2023), o agronegócio, um setor vital que abrange desde a produção primária até a comercialização de produtos agrícolas, é um pilar fundamental da economia global. Ele fornece não apenas alimentos, mas também fibras e combustíveis renováveis, desempenhando seu papel na segurança alimentar mundial e no desenvolvimento sustentável. No contexto internacional, o agronegócio é responsável por uma parcela do emprego e da geração de renda, influenciando as dinâmicas econômicas e sociais de diversos países.

O Brasil, reconhecido como um grande exportador global de produtos agrícolas, contribui decisivamente para a balança comercial e para a segurança alimentar internacional. Produtos como soja, carne bovina, açúcar e café não só dominam os mercados externos, mas também são essenciais para a economia interna, impulsionando o desenvolvimento e a inovação tecnológica no setor (FAO, 2023).

A cadeia do agronegócio brasileiro é complexa e multifacetada, envolvendo uma série de etapas que vão desde o cultivo e criação de animais até o processamento e a distribuição final. Cada elo dessa cadeia — produtores rurais, fornecedores de insumos, indústrias de

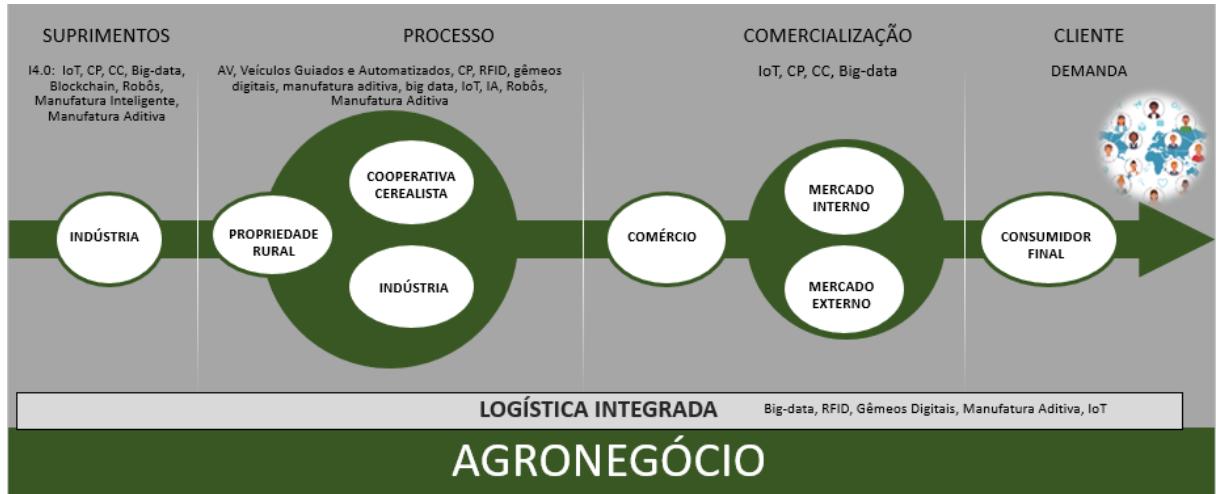
processamento, distribuidores e varejistas — é essencial para o funcionamento eficiente do sistema e para a entrega de produtos de qualidade aos consumidores (Araújo *et al.*, 2021).

Contudo, o setor enfrenta desafios, como a necessidade de modernização tecnológica, a gestão sustentável dos recursos naturais e a adaptação às mudanças climáticas. A superação desses obstáculos é fundamental para garantir a continuidade do crescimento do agronegócio brasileiro e sua contribuição para a economia global, mantendo o compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade social (Araújo *et al.*, 2021). Para compreensão, a Figura 6 foi desenvolvida e adaptada (Araújo *et al.*, 2021)

A representação visual da cadeia do agronegócio oferece uma narrativa abrangente, começando pela fase inicial de suprimento, na qual a indústria de insumos desempenha um papel importante na originação dos elementos essenciais para a produção agrícola (Varella, 2022). A imagem, então, apresenta as diversas etapas do processo, destacando as interações entre propriedades rurais, cooperativas, cerealistas e indústrias. A logística integrada (segunda fase) surge como um ponto de conexão, sublinhando a importância da eficiência no transporte e na movimentação de produtos ao longo da cadeia. A subsequente fase de comercialização destaca as dinâmicas envolvidas nas transações comerciais, abrangendo tanto os comércios interno quanto externo. Finalmente, a ênfase recai sobre o cliente, representando a demanda do consumidor final e conectando diretamente a produção agrícola ao mercado de consumo (Varella, 2022).

Implicitamente, a visualização da cadeia do agronegócio sugere a integração contínua das tecnologias da indústria 4.0 em cada etapa da cadeia, oferecendo oportunidades para melhorias em eficiência, precisão e sustentabilidade. Essa abordagem não apenas destaca a complexidade da cadeia do agronegócio, mas também sublinha a importância estratégica da adoção de tecnologias avançadas para otimizar processos e garantir a eficácia e competitividade contínuas do setor (Fernandez *et al.*, 2021).

Figura 7: Cadeia do Agronegócio



Fonte: adaptado de (ARAÚJO *et al.*, 2021).

A Agricultura 4.0 é a próxima fase evolutiva na indústria agrícola, impulsionada por avanços tecnológicos. Inicialmente manual, evoluiu para a Agricultura 2.0 com mecanização e, posteriormente, para a Agricultura 3.0 com eletrônicos e precisão. A Agricultura 4.0, alinhada com a Indústria 4.0, incorpora tecnologias como IoT, robótica, IA, big data e blockchain, visando melhorar eficiência e sustentabilidade (LIU *et al.*, 2020).

O papel das propriedades rurais, desempenhado essencialmente na produção de alimentos e matérias-primas que abastecem diversos setores econômicos, além de participarem da geração de empregos e renda; destacam-se os cerealistas, as cooperativas e as indústrias do agronegócio, desempenhando funções dentro do processamento e na comercialização dos produtos agrícolas (Rose *et al.*, 2021). Além disso, essas entidades são responsáveis por garantir a distribuição eficiente e a transformação dos produtos agrícolas, facilitando o escoamento da produção. É essencial que a sustentabilidade seja integrada nesse processo, com os participantes adotando práticas que respeitem o meio ambiente e promovam a inovação tecnológica, assegurando assim um agronegócio resiliente e adaptado às demandas futuras (Rose *et al.*, 2021).

Ao considerar as transformações no agronegócio, é fundamental compreender a complexidade inerente a esses processos. O papel do Estado, embora frequentemente subestimado, é de fato preciso, exercendo influência através de políticas públicas, regulamentações e dinâmicas sociais que afetam diretamente o setor. Essas políticas e regulamentações são determinantes para a sustentabilidade e a inovação tecnológica, moldando o ambiente em que o agronegócio opera e contribuindo para o desenvolvimento de um setor mais resiliente e adaptado às exigências contemporâneas e futuras (Liu *et al.*, 2020).

A ativa participação dos agricultores é importante para integrar as tecnologias da Indústria 4.0 no agronegócio. Ao adotar práticas circulares, eles não só revelam os benefícios práticos dessas tecnologias, mas também promovem um ambiente propício para a troca de dados agrícolas. Essa colaboração é chave para avanços que beneficiam a ciência e a sociedade, possibilitando soluções sustentáveis e eficazes para os desafios da pós-colheita. A demanda por especialistas em agronegócio com formação interdisciplinar é um desafio, e é essencial desenvolver capacitação para profissionais que possam preencher essa necessidade, unindo conhecimento de diversas áreas para melhorar a produtividade e assegurar a sustentabilidade do setor (Liu *et al.*, 2020).

Os desafios não se limitam apenas a profissionais *versus* produtores rurais, infraestrutura, tecnologias, mas também emergem entre diferentes grupos e nas lógicas distintas que orientam a expansão das agroindústrias, revelando a complexidade e a diversidade de interesses envolvidos nas transformações sociais nessas regiões (Heredia *et al.*, 2010).

Além dos desafios já mencionados, as práticas de monocultura e pecuária intensiva predominantes no agronegócio industrial geram impactos negativos ao meio ambiente e à saúde animal. A falta de digitalização e inteligência artificial são barreiras significativas para a automação eficiente. Superar essas barreiras pode ser possível através da integração das tecnologias da Indústria 4.0, que oferecem uma gestão mais inteligente da cadeia de abastecimento agroalimentar. Essa integração é um passo adiante na resolução dos desafios de pós-colheita, promovendo a produtividade e sustentabilidade necessárias para atender à complexidade e diversidade de interesses nas transformações sociais das regiões agrícolas (LIU *et al.*, 2020; Heredia *et al.*, 2010).

Para Oliveira *et al.* (2011), a pós-colheita no agronegócio é essencial para manter a qualidade e reduzir perdas de cereais, leguminosas e outros grãos, preparando-os para distribuição e consumo. Inclui processos como secagem, limpeza, armazenamento, transporte e processamento. O objetivo é garantir a segurança alimentar, melhorando a durabilidade dos grãos e mantendo sua qualidade nutricional. Essa cadeia é vital para a sustentabilidade e eficiência agrícola global. A adoção de tecnologias da Indústria 4.0 pode otimizar essas etapas, contribuindo para um sistema mais produtivo e sustentável, alinhado com as práticas circulares e a inteligência coletiva necessária para enfrentar os desafios do setor (EMBRAPA, 2023).

Comparando perdas pós-colheita e desperdício alimentar em países desenvolvidos (EUA, Reino Unido) e em países menos desenvolvidos (destaque para a África subsaariana), a redução das perdas alimentares é vital para aumentar a disponibilidade de alimentos e contribuir para o desenvolvimento do agronegócio. Fatores críticos variam entre pós-portão da fazenda

em países desenvolvidos e pré-portão da fazenda em países menos desenvolvidos, como eficiência e desperdício. Até 2030, nos desenvolvidos, a redução de perdas depende de campanhas educativas, tributação e parcerias público-privadas; nos menos desenvolvidos, a ênfase está na educação agrícola, infraestrutura, cadeias de valor eficazes, marketing coletivo, adoção de tecnologias e compartilhamento de custos entre os setores público e privado (Oliveira *et al.*, 2011).

Ao analisar as etapas da cadeia do agronegócio, observa-se desafios além das fronteiras econômicas, a complexidade social, política e tecnológica. A visualização da cadeia, e suas potencialidades da indústria 4.0, destaca a interconexão dos agentes, das propriedades rurais e dos consumidores finais — também ressalta a estratégia de incorporar as tecnologias em todas as fases para assegurar eficiência e competitividade (Liu *et al.*, 2020).

Segundo Fernandez *et al.* (2021), há uma necessidade em adotar tecnologias da Indústria 4.0 e práticas circulares na cadeia de abastecimento alimentar pós-colheita, em resposta ao aumento das transações digitais e às exigências rígidas de segurança alimentar. A ênfase recai na digitalização da indústria (Indústria 4.0), na logística integrada e na economia circular, visando conscientizar micro, pequenas e médias empresas agroindustriais sobre soluções sustentáveis (Fernandez *et al.*, 2021).

Desse modo, o investimento em pesquisa tecnológica é vital para impulsionar soluções sustentáveis no setor agrícola (Araújo *et al.*, 2021). As transformações não se limitam a aspectos operacionais, permeiam o tecido social, acionam conflitos e redefinem o papel do Estado nesse cenário dinâmico. E, nesse processo, é importante a inserção consciente do consumidor final, ciente da origem e qualidade dos produtos. Em suma, o futuro do agronegócio brasileiro depende da interseção entre tecnologia, responsabilidade social e sustentabilidade, como força propulsora de uma transformação necessária (Araújo *et al.*, 2021).

2.2. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

Esta subseção visa desdobrar como as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, identificadas estão redefinindo os processos produtivos no agronegócio. Através de uma análise das principais tecnologias, explorou-se suas aplicações práticas e o impacto na eficiência, produtividade e sustentabilidade da cadeia de pós-colheita. O foco será entender como a integração dessas tecnologias contribui para a construção de um sistema mais resiliente e adaptável às demandas de um mercado em constante evolução, alinhado com os princípios da economia circular.

O conceito de Indústria 4.0, que surgiu na Alemanha, em 2011, marca uma nova era na evolução industrial. Em contraste com os avanços incrementais na automação fabril, a Indústria 4.0 propõe uma revolução baseada na interconexão de sistemas cibéricos, em que sensores, máquinas e sistemas de informação são integrados ao longo de toda a cadeia produtiva. Essa conectividade permite o uso de protocolos da internet, análise de dados em tempo real e capacidade de adaptação rápida às mudanças. Tal transformação oferece às indústrias benefícios de eficiência, produtividade e redução de custos (Rüssmann *et al.*, 2015).

O estudo de Rüssmann *et al.* (2015) oferece uma visão detalhada sobre os pilares da Indústria 4.0, explorando a interconexão de sistemas cibéricos, a virtualização, a descentralização e a modularidade. Esses conceitos são apresentados como fundamentos da quarta revolução industrial, enfatizando a importância de uma rede integrada de máquinas e sistemas que se comunicam continuamente, criando um ecossistema de produção inteligente. A virtualização permite a criação de cópias digitais do mundo físico, enquanto a descentralização e a modularidade proporcionam flexibilidade e adaptabilidade no processo produtivo. Juntos, esses elementos constituem a essência da Indústria 4.0, marcando uma transformação significativa na maneira como os produtos são fabricados e os serviços são prestados.

A cadeia produtiva integrada é o cerne da Indústria 4.0, onde sensores, máquinas e sistemas de informação operam em sinergia para otimizar a produção. Esta integração resulta em uma operação coesa que eleva a eficiência e a produtividade, ao mesmo tempo em que diminui os custos operacionais. O estudo de Rüssmann *et al.* (2015), mesmo sem detalhar as tecnologias individualmente, estabelece um entendimento robusto dos fundamentos que sustentam essa revolução industrial, ressaltando a importância de uma cadeia produtiva conectada e inteligente.

Conforme Schwab (2017) destaca, a Indústria 4.0 inaugura uma era inovadora na evolução industrial, marcada pela fusão entre automação avançada, comunicação de dados instantânea, análise aprofundada de dados e a integração completa dos sistemas produtivos, tanto vertical quanto horizontalmente. Este avanço traduz-se na digitalização e na interligação dos processos produtivos, culminando na emergência de 'fábricas inteligentes' que são ao mesmo tempo flexíveis e autossuficientes. A Indústria 4.0 catalisa uma metamorfose nos modelos de negócios e eleva a eficiência operacional, simultaneamente abrindo portas para inovações e para a customização em larga escala. Esta transformação radical reformula o modus operandi das empresas e a entrega de valor aos consumidores, exercendo um impacto significativo e abrangente sobre a economia mundial.

No estudo de Schwab (2017), o autor identifica nove tecnologias principais que são fundamentais para a indústria 4.0: Internet das Coisas (IoT), Big Data e Analytics, Computação em Nuvem, Inteligência Artificial (IA), Robôs Autônomos, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada, Simulação e Cibersegurança. David (2016) explora as implicações e transformações da Quarta Revolução Industrial, destacando a convergência de tecnologias digitais, físicas e biológicas que foram adotadas para a pesquisa abordada em seu estudo:

- ✓ Big Data e Analytics: Coleta, processamento e análise de grandes volumes de dados para obter ideias e tomar decisões embasadas.
- ✓ Robôs Autônomos: Utilização de robôs autônomos ou colaborativos em ambientes industriais, para melhorar a eficiência e a precisão.
- ✓ Simulação digital: Criação de modelos virtuais que reproduzem o comportamento de sistemas físicos, permitindo testes e otimizações antes da implementação real. Os gêmeos digitais são réplicas virtuais em tempo real de objetos ou sistemas físicos, combinando dados em tempo real e modelos virtuais para monitorar, analisar e simular o comportamento em tempo real. Com isso, possibilitam testes e otimizações virtuais, permitindo a análise e o aprimoramento de processos antes da implementação real, contribuindo para a eficiência e a redução de riscos.
- ✓ Internet das Coisas (IoT): Conexão e comunicação entre objetos físicos e sistemas digitais, permitindo a troca de informações e automação. É responsável por promover a conectividade e a coleta de dados em tempo real, viabilizando o monitoramento preciso das condições de armazenamento, transporte e processamento de grãos.
- ✓ Computação em Nuvem/Blockchain: Armazenamento, processamento e acesso a dados e recursos computacionais por meio de servidores remotos e redes. Blockchain é a tecnologia de registro distribuído, que oferece transparência, segurança e confiabilidade em transações e processos. Por meio desse processo, é possível facilitar o armazenamento e o acesso remoto a dados, possibilitando a colaboração e o compartilhamento de informações entre os participantes da cadeia.

E o blockchain - registro distribuído que assegura transparência e confiabilidade em transações para garantir rastreabilidade e autenticidade em toda a cadeia de suprimentos agrícola.

- ✓ Manufatura Aditiva (Impressão 3D): Criação de objetos físicos, camada por camada, a partir de modelos digitais, permitindo a produção personalizada e ágil. É responsável por oferecer flexibilidade na produção de peças e equipamentos específicos para o setor pós-colheita, permitindo soluções personalizadas e rápidas.

- ✓ Realidade Virtual (VR) e Realidade Aumentada (AR): Utilização de ambientes virtuais e sobreposição de informações digitais no mundo físico, para aprimorar processos e interações. A partir delas, torna-se possível aprimorar a formação de profissionais e a execução de tarefas complexas, proporcionando uma visão aprofundada e contextualizada das operações.
- ✓ Cibersegurança: Proteção de sistemas, redes e dados contra ameaças cibernéticas. Os sistemas ciberfísicos correspondem à Integração de sistemas físicos e digitais para monitorar e controlar processos de produção em tempo real. A cibersegurança permite proteger os sistemas contra ameaças cibernéticas, garantindo a integridade dos dados e a continuidade segura das operações.
- ✓ Inteligência Artificial (IA) e aprendizado de máquina: Uso de algoritmos e sistemas para simular a inteligência humana, possibilitando a automação e a tomada de decisões inteligentes. O aprendizado de máquina é uma área da inteligência artificial que possibilita às máquinas aprenderem com os dados e tomarem decisões com base nesse aprendizado. Esse tipo de aprendizado capacita a automação de processos e a análise preditiva, contribuindo para a otimização da eficiência operacional e para a antecipação de demandas.
- ✓ Integração de sistemas e interoperabilidade: O primeiro corresponde à conexão e colaboração entre diferentes sistemas e dispositivos, tanto dentro de uma organização quanto entre organizações; e o segundo, à capacidade dos sistemas e dispositivos interagirem e trocarem informações.

As 3 tecnologias fundamentais para a Indústria 4.0, como Big Data, Robôs Autônomos e Internet das Coisas, convergem para impulsionar a transformação digital. Desde a simulação digital até a inteligência artificial, essas ferramentas colaboram para otimizar processos, promover eficiência e moldar a nova era industrial (VARELLA, 2022). Essa interconexão não apenas representa avanços tecnológicos, mas também delineia um futuro em que a automação inteligente e a colaboração são essenciais para o progresso industrial.

As tecnologias adotadas para a aplicação da presente pesquisa estão elencadas na Tabela 2, baseada na revisão realizada na presente pesquisa.

Tabela 2 - Tecnologias da Indústria 4.0

Códigos	Tecnologias	Autores
I40_1	Big Data e Analytics	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (KUMAR <i>et al.</i> , 2021), (BELAUD <i>et al.</i> , 2019), (KAZANCOGLU <i>et al.</i> , 2022), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
I40_2	Robôs Autônomos	(MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
I40_3	Simulação Digital e Gêmeos Digitais	(VARELLA, 2022)
I40_4	Internet das Coisas (IoT)	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (KRSTIĆ <i>et al.</i> , 2022), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (KUMAR <i>et al.</i> , 2021), (MUKHERJEE <i>et al.</i> , 2021), (ISLAM <i>et al.</i> , 2022), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
I40_5	Computação em Nuvem / Blockchain	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (KUMAR <i>et al.</i> , 2021), (MUKHERJEE <i>et al.</i> , 2021), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
I40_6	Impressão 3D e Manufatura Aditiva	(FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (ISLAM <i>et al.</i> , 2022), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
I40_7	Realidade Virtual e Aumentada	(SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
I40_8	Cibersegurança Industrial	(FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (KRSTIĆ <i>et al.</i> , 2022), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
I40_9	Integração de Sistemas e Interoperabilidade	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (KUMAR <i>et al.</i> , 2021), (ISLAM <i>et al.</i> , 2022), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
I40_10	Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina	(FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 2 é uma síntese dos resultados adaptados da pesquisa teórica, fornecendo uma relação clara entre as tecnologias da Indústria 4.0 e os artigos científicos que abordaram essas inovações na intricada cadeia do agronegócio. Essa representação tabular destaca a convergência de conhecimento ao mapear minuciosamente quais tecnologias foram discutidas em cada artigo científico, proporcionando uma visão abrangente da interseção entre avanços tecnológicos e as nuances do agronegócio moderno.

Conforme avança o trabalho na exploração das amplas capacidades das tecnologias da Indústria 4.0, torna-se evidente o potencial transformador que essas inovações têm sobre a pós-colheita. O enlace entre algumas das tecnologias de inovações como Internet das Coisas,

Inteligência Artificial, e Manufatura Aditiva, com a busca por práticas sustentáveis no agronegócio, delineia um caminho possível conclusão da pesquisa. Nesse ponto, traçou-se a linha de pesquisa que conecta o poder transformador dessas tecnologias à visão abrangente da economia circular no agronegócio.

Segundo Kasera *at.al.* (2024), a integração das tecnologias IoT, AIoT e Edge Computing no agronegócio inteligente está revolucionando a forma como os produtores gerenciam suas operações. Essas tecnologias permitem a coleta e análise de dados em tempo real, otimizando processos em todas as fases da produção agrícola, desde a pré-colheita até a pós-colheita. A AIoT aplica inteligência artificial para prever e otimizar processos. A computação de borda, por sua vez, garante que esses dados sejam processados localmente, reduzindo a latência e aumentando a eficiência operacional.

Ao adentrarmos no território da economia circular, procuramos entender não só como essas ferramentas modernizam processos, mas também catalisam mudanças que transcendem o âmbito tecnológico, redefinindo os paradigmas de produção e consumo no agronegócio. Esse é o ponto de convergência entre a inovação tecnológica e a sustentabilidade, em busca de um futuro resiliente e equitativo para o setor agrícola.

2.3. ECONOMIA CIRCULAR

Esta subseção analisa como os princípios da economia circular são aplicados no contexto do agronegócio para promover a sustentabilidade, a eficiência dos recursos e a resiliência dos sistemas, busca-se identificar as barreiras e os facilitadores dessa transição, bem como as implicações para os stakeholders envolvidos, incluindo produtores, consumidores e formuladores de políticas.

A economia circular, conforme discutido por Rizos *et al.* (2017), baseia-se na premissa de que os sistemas econômicos e industriais devem ser concebidos para restaurar, regenerar e reutilizar recursos continuamente, minimizando a necessidade de novos insumos e reduzindo o desperdício. Em vez de adotar uma abordagem linear de "extrair, usar e descartar", a economia circular promove um ciclo fechado onde materiais e produtos são mantidos em uso pelo maior tempo possível. Este modelo valoriza a eficiência, resiliência e sustentabilidade, e engloba práticas como a reutilização, a reciclagem, a remanufatura e a recuperação de materiais. A implementação de tais processos não só contribui para a conservação dos recursos naturais, mas também oferece benefícios econômicos e ambientais significativos ao mitigar os impactos negativos da atividade industrial (RIZOS *et al.*, 2017).

Segundo a Fundação Ellen MacArthur (2015), a economia circular é um modelo econômico e industrial que visa repensar e redesenhar os sistemas produtivos, eliminando o conceito de resíduos e promovendo o uso de recursos de forma sustentável. Nesse modelo, os produtos são projetados para serem duráveis, reparáveis e recicláveis, permitindo que os materiais sejam reutilizados ao final de seu ciclo de vida.

De acordo com o Relatório da Comissão Europeia sobre Economia Circular (2015), esse sistema se baseia no princípio de que os produtos, materiais e recursos devem ser mantidos em uso pelo maior tempo possível, maximizando seu valor econômico e minimizando o desperdício. Os produtos são projetados para serem facilmente desmontados, e seus componentes e materiais são recuperados e reintroduzidos na cadeia produtiva.

A economia circular implica repensar toda a cadeia de valor, desde a extração de matérias-primas até a gestão pós-consumo, incorporando princípios como a reutilização, a remanufatura, a reciclagem e a compostagem. Essa abordagem visa reduzir a dependência de recursos finitos, minimizar os impactos ambientais e criar um sistema econômico e sustentável. Segundo a Fundação Ellen MacArthur (2015), a adoção de princípios circulares na agricultura pode ajudar a reduzir o desperdício, otimizar o uso de recursos e promover práticas agrícolas regenerativas.

A implementação da economia circular requer a colaboração de diferentes atores, como governos, empresas e consumidores, para a criação de políticas, modelos de negócios e práticas que promovam a transição para um sistema circular. Ademais, a circularidade na produção do agronegócio envolve a adoção de abordagens agroecológicas, como a diversificação de culturas, a rotação de culturas e a gestão integrada de pragas, para promover a resiliência dos ecossistemas agrícolas. Ao avançar em direção a uma agricultura circular, busca-se enfrentar os desafios atuais e futuros da produção de alimentos de forma sustentável, garantindo a segurança alimentar e a proteção ao meio ambiente.

De acordo com a European Commission (2015), o plano de ação da União Europeia para a Economia Circular — a transição para um sistema circular na produção de alimentos — pode oferecer uma série de benefícios. Por meio da implementação de práticas sustentáveis no agronegócio, abordagens inovadoras e integradas, como a reciclagem de nutrientes, a gestão adequada de resíduos agrícolas e o apoio à produção local, é possível avançar em direção a um sistema alimentar circular e resiliente, garantindo a disponibilidade de alimentos saudáveis e sustentáveis e promovendo o desenvolvimento sustentável.

Os princípios da economia circular têm sido amplamente discutidos e adotados no agronegócio como uma abordagem estratégica para promover a sustentabilidade, minimizar o

desperdício e criar valor a partir de recursos renováveis e recicláveis.. Na concepção da Fundação Ellen MacArthur (2015), esses princípios envolvem a criação de sistemas alimentares regenerativos, nos quais os resíduos são minimizados, sendo os recursos consumidos. Isso implica a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, como a aplicação de técnicas de gestão de nutrientes, a diversificação de culturas, a implementação de sistemas agroflorestais e a utilização de energias renováveis.

A transição para a economia circular no agronegócio é fundamental para a abordagem dos desafios crescentes de sustentabilidade e eficiência. De acordo com a Fundação Ellen MacArthur (2015), a economia circular propõe uma abordagem transformadora, na qual os sistemas produtivos são repensados e redesenhadados para eliminar resíduos e otimizar o uso de recursos. No âmbito do agronegócio, isso implica projetar produtos duráveis, reparáveis e recicláveis, promovendo a reutilização de materiais ao final de seu ciclo de vida.

Ainda segundo a Fundação Ellen MacArthur (2015), o agronegócio, ao adotar os princípios da economia circular, busca não apenas a colaboração entre governos, empresas e consumidores para desenvolver políticas e modelos de negócios sustentáveis, mas também se empenha em práticas agroecológicas inovadoras. Tais práticas incluem a diversificação de culturas e a gestão integrada de pragas, que não só promovem a resiliência dos ecossistemas, mas também aumentam a biodiversidade, melhoram a qualidade do solo e da água, e contribuem para a mitigação das mudanças climáticas.

O *framework* ReSOLVE, desenvolvido pela Comissão Europeia (2015), é uma abordagem abrangente na implantação da economia circular no agronegócio. Cada componente do *framework* representa uma prática específica (Repensar, Explorar, Sistematizar, Otimizar, Valorizar e Engajar). O *framework* oferece uma abordagem prática para a implementação da economia circular no agronegócio. Ao explorar novas oportunidades, sistematizar práticas circulares, otimizar operações agrícolas, valorizar aspectos econômicos, sociais e ambientais e engajar diversas partes interessadas pode maximizar a eficiência do uso de recursos e promover a sustentabilidade em toda a cadeia agrícola. Essas práticas integradas são cruciais para enfrentar os desafios presentes e futuros da produção de alimentos de maneira sustentável, garantindo a segurança alimentar e a proteção ao meio ambiente.

Segundo o relatório da Comissão Europeia (2015) sobre a economia circular, esse modelo abrangente busca maximizar a eficiência do uso de recursos no setor agrícola:

- ✓ Explorar (*Explore*): A prática de explorar envolve a investigação de novas oportunidades e abordagens inovadoras. Isso inclui a busca por soluções que promovam

a circularidade na agricultura, como novas tecnologias, métodos de cultivo sustentáveis e modelos de negócio inovadores.

- ✓ Sistematizar (*Systemize*): Aqui, o foco está na integração das práticas circulares nos sistemas e processos agrícolas existentes. O objetivo é garantir que as práticas sustentáveis se tornem parte integrante e contínua das operações agrícolas.
- ✓ Otimizar (*Optimize*): A prática de otimizar visa aprimorar continuamente as operações agrícolas e os produtos. Isso envolve ajustes e melhorias para maximizar a eficiência, reduzir o desperdício e minimizar os impactos ambientais.
- ✓ Valorizar (*Value*): Valorizar refere-se à criação e manutenção de valor ao longo do tempo. Isso não se limita apenas aos aspectos econômicos, mas abrange os valores social e ambiental das práticas agrícolas circulares.
- ✓ Engajar (*Engage*): A etapa final do *framework* destaca a importância da colaboração com diversas partes interessadas. Isso inclui agricultores, consumidores, autoridades reguladoras e outras partes envolvidas na cadeia agrícola. O engajamento promove a economia circular de maneira abrangente.

Essas práticas, quando implementadas de maneira integrada, visam maximizar a eficiência do uso de recursos, reduzir impactos ambientais e promover a sustentabilidade no setor agrícola.

Para aplicar o questionário da pesquisa, foram selecionadas, da revisão sistemática, as práticas consideradas circulares abordadas pelos artigos. Para facilitar, foram descritas as práticas voltadas para a cadeia de aplicação da pesquisa e elencados os artigos que cada qual abordou (Tabela 3).

(Continua)

Tabela 3 - Práticas da Economia Circular adotadas na pesquisa

Códigos	Descrição das Práticas da Economia Circular	AUTORES
EC_1	Regenerar: regenerar e estruturar o capital natural por meio da mudança de projetos para criação de matéria prima, produtos e serviços circulares. Ex. produção de biocombustíveis, compostagem, bi refinação; através de design regenerativo.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (KUMAR <i>et al.</i> , 2021), (ISLAM <i>et al.</i> , 2022), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
EC_2	Recusar: Através de produtos redundantes, substituindo a função inicial ou oferecer com produto diferente. Ex. utilizar subprodutos ou direcionar para a produção de ração.	(MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (KUMAR <i>et al.</i> , 2021), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)

(Continua)

EC_3	Compartilhar: através da maximização de ativos; compartilhando o acesso de produtos, bens e serviços (planejado). Ex. compartilhar logística, equipamentos industriais, equipamentos agrícolas; com economia colaborativa, economia compartilhada de bens e ativos.	(MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (KUMAR <i>et al.</i> , 2021), (VARELLA, 2022)
EC_4	Recondicionar / Remanufaturar / Renovar: Restaurar um produto. Ex. desenvolver e comercializar subprodutos com os resíduos de grãos, equipamentos entre outros.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (KUMAR <i>et al.</i> , 2021), (ISLAM <i>et al.</i> , 2022), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (VARELLA, 2022)
EC_5	Otimizar: através da otimização do sistema, por desempenho/performance. Ex. manter, melhorar ou aumentar a vida útil de produtos, bens e serviços; com design Thinking, lifecycle, design para toda cadeia de suprimentos.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (VARELLA, 2022)
EC_6	Reducir: reduzir consumo de recursos durante fabricação ou uso Ex. Utiliza programa para reduzir/eliminar a geração de resíduos na produção.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (KAZANCOGLU <i>et al.</i> , 2022), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *b), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
EC_7	Reaproveitar / Reutilizar: utilizar o material ou produto de outra maneira de consumo. Ex. reutilização máxima de materiais na produção.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (MARIATTI <i>et al.</i> , 2021), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (KAZANCOGLU <i>et al.</i> , 2022), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
EC_8	Ciclar: materiais e produtos permanecerem em ciclos, priorizando loops internos. Ex. criar valor para materiais, componentes e produtos; reutilização de resíduos vegetais, recuperação de materiais	(FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (KRSTIĆ <i>et al.</i> , 2022), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (BELAUD <i>et al.</i> , 2019), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
EC_9	Reciclar: processar os materiais e manter a condição de qualidade. Ex. reciclagem de fibras têxteis para produção de artigos têxteis.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (KRSTIĆ <i>et al.</i> , 2022), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (KAZANCOGLU <i>et al.</i> , 2022), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (SILVA <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)

(Continua)

EC_10	Reparar / Manter: reestabelecer a condição em sua função original. Ex. restaurar o valor dos produtos e embalagens pós-consumo por meio de reparo e manutenção.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (KRSTIĆ <i>et al.</i> , 2022), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (VARELLA, 2022)
EC_11	Repensar: novos usos para o produto de forma intensa. Ex. classifica/remanufatura os grãos por defeitos de beneficiamento e armazenagem captados por meio de sistema prolongar a vida útil do produto.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (KRSTIĆ <i>et al.</i> , 2022), (BELAUD <i>et al.</i> , 2019), (SKOROBOGATOVA <i>et al.</i> , 2023 *a), (VARELLA, 2022)
EC_12	Recuperar / Renovar: recuperar através da incineração de produto e recuperação por aproveitamento da energia gerada. Ex. queima de resíduos agroindustriais	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (KRSTIĆ <i>et al.</i> , 2022), (BELAUD <i>et al.</i> , 2019), (VARELLA, 2022)
EC_13	Prolongar: aumentar a vida útil. Ex. reutilizar materiais ao final de vida útil.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2021), (FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (KRSTIĆ <i>et al.</i> , 2022), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)
EC_14	Virtualizar: deslocar o uso de recursos através de tecnologias virtuais. Ex. substituir infraestrutura e ativos físicos por serviços digitais; oferta de serviços remotos, catálogos virtuais.	(FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2021), (MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (MUKHERJEE <i>et al.</i> , 2021), (VARELLA, 2022)
EC_15	Trocá: seleção adequada de recursos, produtos e tecnologias. Ex. eliminar processo de venda, substituindo por um serviço atualizado, substituição de bens antigos e não renováveis por produtos avançados e renováveis.	(MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (VARELLA, 2022)
EC_16	Reposicionar: uso em novo produto de partes do produto ou de todo o produto. Ex. substituir materiais perigosos para aumentar a participação de recursos renováveis e recicláveis.	(MAHROOF <i>et al.</i> , 2021), (CHAKRAPANI <i>et al.</i> , 2022), (VARELLA, 2022)

Fonte: Adaptado pelo autor.

Ao estabelecermos uma base sólida sobre os princípios da economia circular para o agronegócio, realizou-se uma pesquisa aplicada que conecte teoria e prática. A compreensão detalhada das práticas circulares discutidas na literatura, conforme delineado pela Fundação Ellen MacArthur (2015) e pela Comissão Europeia (2015), fornece a estrutura para a condução desta pesquisa.

Agora, avançamos para a fase de aplicação, na qual exploraremos como esses princípios são refletidos nas práticas reais da cadeia produtiva. Para guiar a investigação, a Tabela 3 aborda a revisão sistemática aos conceitos das práticas da economia circular, é a ferramenta que apresenta uma visão consolidada dos autores e artigos que abordaram cada prática circular específica. Essa abordagem metodológica visa capturar as nuances e variedades de

implementação das práticas circulares na realidade do agronegócio, proporcionando uma compreensão holística que transcende as palavras da teoria para a ação prática.

2.4. A RELAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E A ECONOMIA CIRCULAR NO AGRONEGÓCIO

Conforme identificado nesta pesquisa, a cadeia do agronegócio está sendo transformada pela adoção de tecnologias da Indústria 4.0, tais como Internet das Coisas, cibersegurança, computação em nuvem, big data, blockchain, robótica, manufatura inteligente e manufatura aditiva. Essas inovações estão alavancando as práticas circulares, que incluem estratégias de regeneração, recusa, compartilhamento, recondicionamento, remanufatura, renovação, otimização, *loop*, virtualização, troca, ciclagem, reflexão, recuperação, redução, reaproveitamento, reutilização, prolongamento e reposicionamento, para promover um desenvolvimento sustentável no setor.

Sharma *et al.* (2021) realizaram uma pesquisa na cadeia de suprimentos do agronegócio com foco nos atores que promovem a adoção de tecnologias da Indústria 4.0. Tecnologias como Segurança cibernética, IoT, blockchain e big data foram exploradas por seu potencial de aprimorar a circularidade. Em seguida, por meio de uma revisão sistemática da literatura, os autores aplicaram a modelagem estrutural interpretativa integrada (ISM-DEMATEL). Esse método foi utilizado para identificar as dependências, hierarquias e causalidades entre os atores envolvidos. Os resultados destacaram a importância da rastreabilidade na perspectiva da economia circular para a cadeia do agronegócio, mas ressaltaram a necessidade de manter a conectividade contínua e o fluxo de informações, além da utilização de tecnologias de contagem descentralizada e distribuída.

Sharma *et al.* (2021) empregaram a modelagem estrutural interpretativa integrada (ISM-DEMATEL) para analisar as dependências e causalidades entre atores impulsionando a adoção de tecnologias na cadeia do agronegócio, focando em melhorar a circularidade; o modelo ReSOLVE oferece uma abordagem abrangente e prática para implementar a economia circular, destacando a importância de práticas específicas, como explorar, sistematizar, otimizar, valorizar e engajar, na busca por eficiência e sustentabilidade em toda a cadeia agrícola.

Na busca por aprimorar a circularidade nas operações do agronegócio, Sharma *et al.* (2021) propuseram a implementação de uma estrutura baseada nos 12 Rs, alinhada ao modelo ReSOLVE. Destacando a prática de regeneração como central, a pesquisa evidenciou a importância de aproveitar materiais para a fabricação de novos produtos com funcionalidade

similar. Essa abordagem, focada na maximização do valor dos recursos, proporciona uma base sólida para o avanço da economia circular na agricultura.

Em uma perspectiva similar, Mahroof *et al.* (2021) adotaram a Modelagem Estrutural Interpretativa (ISM) para investigar o potencial da Indústria 4.0 na cadeia de suprimentos agrícolas. Ao explorar tecnologias como drones, IoT, inteligência artificial e robôs, o estudo concentrou-se nas práticas da economia circular, como regenerar e otimizar. Os desafios identificados, como desmatamento ilegal e falta de eficiência, ressaltam a necessidade de abordagens inovadoras para superar obstáculos e promover a regeneração nos processos agrícolas.

Alinhando-se a esses esforços, Kumar *et al.* (2021) utilizaram técnicas de modelagem Matemática, Delphi e ISM para investigar a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 na produção de cacau, relacionadas à adoção das tecnologias: Internet das coisas (IoT), Cyber-sistema físico (CP), *Cloud Computing* (CC) e Big-data. A perspectiva ReSOLVE, adotada na análise, permitiu a identificação de obstáculos significativos, como a falta de apoio governamental e políticas inadequadas. Os resultados desse estudo contribuíram para o entendimento crítico das barreiras impostas para a implementação de tecnologias habilitadoras e práticas circulares na cadeia de abastecimento do agronegócio.

Em uma abordagem centrada na rastreabilidade, Mukherjee *et al.* (2021) investigaram a implementação de tecnologias como blockchain, IoT e computação em nuvem na cadeia de suprimentos do agronegócio e as práticas circulares de regenerar, recusar, reduzir, reaproveitar, reutilizar, ciclar, prolongar, reposicionar. Utilizando o processo hierárquico analítico (AHP), eles compararam sistemas tradicionais com aqueles habilitados para blockchain, demonstrando a superioridade do último em termos de sustentabilidade e circularidade. Essa visão, alinhada à ReSOLVE, oferece observações sobre como integrar tecnologias para promover práticas circulares para o agronegócio.

Esses estudos indicam uma convergência de esforços para transformar o agronegócio por meio de práticas sustentáveis e circulares. A implementação do modelo ReSOLVE emerge como uma abordagem integral para a maximização do valor dos recursos, destacando-se como um elo entre as pesquisas de Sharma *et al.* (2021), Mahroof *et al.* (2021) e Kumar *et al.* (2021), que exploram tecnologias específicas dentro da Indústria 4.0. A abordagem centrada na rastreabilidade, conforme explorada por Mukherjee *et al.* (2021), adiciona uma camada à discussão, evidenciando como a integração de tecnologias pode potencializar a sustentabilidade e a circularidade na agricultura. Esses esforços coletivos buscam, portanto, redefinir os paradigmas tradicionais e promover uma agricultura ambientalmente responsável.

Seguindo a cadeia do agronegócio proposta no presente trabalho, vem a pós-colheita, onde os autores abordaram de forma direta, em seu estudo de revisão sistemática da literatura.

No contexto da pós-colheita, a pesquisa de Fernandez *et al.* (2021) amplia a discussão das adoções ao explorar o impacto das tecnologias da Indústria 4.0, como Inteligência Artificial, IoT, automação, Cybersegurança e robótica, no setor de pós-colheita do agronegócio, em conjunto com as práticas da economia circular, como regenerar, recondicionar, remanufaturar, renovar e reciclar. Aprofundando-se nas práticas da economia circular, o estudo visou analisar as tendências que impulsionam a sustentabilidade no setor agroindustrial. Em particular, o foco recaiu sobre a eficiência, no âmbito das embalagens ecológicas, ativas e inteligentes.

Os resultados da pesquisa de Fernandez *et al.* (2021) apontaram para um desafio premente no setor de pós-colheita: a perda e o desperdício de alimentos. Nesse cenário, diversas publicações da pesquisa de Fernandez *et al.* (2021), destacaram uma tendência crescente para a adoção de embalagens ecológicas, inteligentes e ativas como uma estratégia para mitigar o desperdício de alimentos e promover a ecoeficiência. Essa abordagem não apenas contribui para o enfrentamento dos desafios associados à gestão pós-colheita, como também se alinha à crescente necessidade de práticas sustentáveis em toda a cadeia do agronegócio. Ao integrar tecnologias inovadoras e práticas circulares, o setor de pós-colheita busca não apenas otimizar a eficiência operacional, mas também promover a responsabilidade ambiental e social em seus processos.

Na sequência da cadeia do agronegócio, foi abordada a geração e a gestão de resíduos sólidos no setor, um tema relevante, considerando que o agronegócio gera uma grande quantidade de resíduos, como embalagens de agrotóxicos, restos de colheita, esterco e poluição. Em seguida, quatro artigos da revisão da literatura trataram da geração e gestão de resíduos sólidos no agronegócio.

A gestão adequada de resíduos sólidos no agronegócio visa minimizar os impactos ambientais e atender às normas legais, como estabelecido pela Resolução CONAMA nº 358/2005, que define critérios específicos para o manejo desses resíduos, conforme apontado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Nesse contexto normativo, Islam *et al.* (2022) direcionam sua atenção para a gestão de resíduos agrícolas, explorando oportunidades de negócios e tecnologias da economia circular, como impressão 3D e Internet das Coisas (IoT).

Suas descobertas destacam a necessidade de estruturas centralizadas, responsabilidade estendida do produtor e parcerias estratégicas como elementos para uma gestão eficaz (Islam *et al.*, 2022). Os autores elaboraram uma revisão sistemática da literatura, pautada em economia

circular e na utilização de tecnologias como impressão tridimensional, etiquetas RFID baseadas em sensores, gêmeos digitais, manufatura aditiva e Internet das Coisas (IoT).

A pesquisa de Islam *et al.* (2022) buscou investigar os elementos-chave das variáveis e a principal barreira em nível de setor, a partir das perspectivas de modelos de negócio circulares. Os resultados indicaram a gestão de resíduos sólidos do agronegócio por meio do estabelecimento de centrais, da implementação de responsabilidade estendida do produtor, de parcerias estratégicas, de incentivos e do *design* do produto como requisitos críticos para a evolução da circularidade.

Explorando a aplicação de tecnologias da indústria 4.0, Belaud *et al.* (2019) concentraram-se em promover a sustentabilidade na gestão de resíduos agrícolas, com um enfoque específico na valorização da palha de arroz. O estudo visou alcançar a circularidade de produtos por meio da gestão do ciclo de vida, com foco na bioconversão, incluindo aspectos ambientais, sociais e econômicos da cadeia de abastecimento do agronegócio. O trabalho se concentrou no uso das tecnologias da indústria 4.0, como inteligência artificial, IoT, automação, assim como no *design* da cadeia de abastecimento do agronegócio, para melhorar a gestão da sustentabilidade e valorizar os resíduos agrícolas.

A abordagem envolveu cinco etapas, que perpassaram a inteligência artificial e a automação, a fim de melhorar a gestão da sustentabilidade na cadeia de abastecimento agrícola, utilizando a tecnologia *big data* e a avaliação da sustentabilidade, por meio da ferramenta de ciclo de vida e desenvolvimento de indicadores. Seguindo essa linha de investigação, Chakrapani *et al.* (2022) concentraram-se nos resíduos alimentares, propondo a adoção da bioeconomia circular e integrando tecnologias da indústria 4.0 para minimizar o desperdício em várias fases da produção.

Em sua revisão sistemática de literatura para a gestão de resíduos sólidos do agronegócio, Chakrapani *et al.* (2022) discutiram a possibilidade de utilizar resíduos de alimentos para aplicações biomédicas, visando promover a bioeconomia circular e apoiar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, em conjunto com as tecnologias da indústria 4.0. A revisão enfatizou a importância da implementação de abordagens como a manufatura inteligente, robôs, *blockchain*, impressão 3D e avaliação do ciclo de vida social (S-LCA) para minimizar o desperdício de alimentos em diferentes níveis de produção.

Abrindo uma perspectiva ampla, Kazancoglu *et al.* (2022) utilizam a Modelagem Estrutural Interpretativa para examinar desafios na gestão de resíduos alimentares, destacando a necessidade de políticas eficazes e a aplicação de tecnologias da indústria 4.0, big data e IoT. Eles apontam que, mesmo com um planejamento cuidadoso, a implementação da gestão de

resíduos é desafiadora em economias emergentes. A pesquisa visou determinar os desafios na gestão de resíduos alimentares para a transição da economia circular e encontrar soluções permanentes para eles, abordando as práticas de regenerar, recusar, otimizar, reduzir, reaproveitar e reutilizar.

Os resultados do estudo de Kazancoglu *et al.* (2022) demonstraram que a gestão de resíduos deve ser cuidadosamente planejada, no entanto, mesmo assim, sua implementação é difícil em economias emergentes, nas quais é difícil reciclar. Os autores identificaram 16 desafios para essa gestão, priorizando a questão da gestão em termos de implicações gerenciais e políticas. As sugestões incluem a necessidade de novas políticas e a ênfase na utilização de tecnologias avançadas da indústria 4.0, destacando a necessidade de ações voltadas à promoção da circularidade.

Adentrando no setor de cacau, Mariatti *et al.* (2021) propõem um modelo híbrido de tomada de decisão multiobjetivo (MCDM – decisão multiobjetivo), o qual combina o método de *Analytical Hierarchy Proces* (AHP) com as tecnologias de *big data*, IoT, manufatura aditiva, cyber segurança e impressão 3D para a gestão de resíduos. O modelo foi utilizado juntamente com a integração de novos paradigmas de negócios, em particular, práticas da economia circular, como ciclar, reciclar, reparar, manter, repensar, recuperar, renovar e prolongar, para impulsionar a sustentabilidade na cadeia do cacau, por meio da recuperação de compostos de alto valor agregado.

Esta abordagem estratégica integra os princípios da economia circular e as inovações da Indústria 4.0 para fomentar a sustentabilidade na cadeia produtiva do cacau. A valorização de subprodutos, conforme destacado por Mariatti *et al.* (2021), não só contribui para a redução da poluição ambiental, mas também abre caminho para a criação de novos mercados e fontes de receita. Ao transformar resíduos em recursos, as empresas podem diminuir custos de produção e ao mesmo tempo gerar produtos que atendem às demandas de um mercado consciente.

Assim, esses estudos convergentes ressaltam a importância crítica de uma gestão eficaz de resíduos agrícolas, sublinhando a necessidade de políticas robustas e parcerias estratégicas, assim como da aplicação de tecnologias avançadas para promover a circularidade nesse aspecto. Essa relação entre economia circular, indústria 4.0 e gestão sustentável de resíduos revela uma abordagem integrada e abrangente para impulsionar a sustentabilidade no setor do agronegócio.

Na sequência da cadeia vem a logística do agronegócio dentro do pós-colheita, desempenhando seu papel nessa fase, exigindo uma abordagem estratégica para mitigar os impactos ambientais e promover práticas sustentáveis. Subsequentemente, os artigos exploram

a complexidade e as nuances do agronegócio, delineando desafios e oportunidades específicas desse cenário logístico.

O estudo de Gómez *et al.* (2020) destaca a contribuição vital de ferramentas como a Internet das Coisas (IoT), os sistemas de monitoramento, rastreamento em tempo real e algoritmos de inteligência artificial na melhoria da eficiência logística. A implementação dessas tecnologias não apenas aprimora o fluxo de informações, mas também permite práticas sustentáveis, como reutilização de materiais e reciclagem de resíduos, construindo um ciclo produtivo consciente e responsável.

Nessa perspectiva, Krstić *et al.* (2022) exploram a logística na cadeia do agronegócio, utilizando métodos como AHP e COBRA (tomada de decisão multicritério – MCDM, um novo modelo híbrido que combina o método Analytical Hierarchy Process – AHP) para hierarquizar áreas de interesse na economia circular. Seu trabalho oferece uma estrutura para a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 nas atividades logísticas, promovendo uma abordagem sistêmica para a gestão da cadeia de suprimentos e do ciclo de vida.

A adoção integrada de tecnologias como Internet das Coisas, Inteligência Artificial e Blockchain, em conjunto com ações circulares, destaca o potencial transformador das práticas de reutilização, remanufatura e reciclagem na gestão da cadeia de suprimentos. Essa abordagem, conforme indicado por Krstić *et al.* (2022), não apenas impulsiona a eficiência logística, mas também fortalece a circularidade, alinhando-se aos princípios da economia circular no contexto agrícola.

A aplicação dessas tecnologias, como destacado por Krstić *et al.* (2022), não só oferece vantagens logísticas, mas também representa uma abordagem integrada para promover a circularidade na gestão da cadeia de suprimentos. A interligação entre práticas da Indústria 4.0 e estratégias circulares otimiza a logística e cria um ambiente propício para uma gestão consciente e sustentável na cadeia do agronegócio.

Em síntese, a fusão entre tecnologias avançadas da Indústria 4.0 e estratégias circulares na logística do agronegócio destaca-se como um vetor poderoso para a eficiência operacional e a sustentabilidade. Essa abordagem integrada não apenas redefine a logística, mas também contribui para a gestão responsável da cadeia de suprimentos e do ciclo de vida no agronegócio.

Nesse cenário, a incorporação das tecnologias da Indústria 4.0 no setor do agronegócio pode contribuir para a implementação da circularidade no segmento de pós-colheita e aprimorar as operações de toda a cadeia produtiva. Essa abordagem mitigaria os efeitos adversos, como as emissões atmosféricas, o descarte inadequado de produtos químicos e suas embalagens nos efluentes e no meio ambiente, o que, habitualmente, afeta as comunidades locais e as fontes de

água; e, ainda, aprimoraria a saúde e a segurança dos indivíduos envolvidos. A seguir, a Tabela 4 apresenta a relação entre as tecnologias da indústria 4.0 e as ferramentas da economia circular abordadas nos artigos da revisão sistemática; tanto as tecnologias, quanto as práticas foram elencadas de cada artigo selecionado.

Tabela 4 - Relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas da Economia Circular

Autor e Ano	País	Metodologia	Seção	Tecnologia Indústria 4.0	Práticas abordadas da Economia Circular
Sharma <i>et al.</i> , (2021)	Índia	Revisão Sistemática da literatura, modelagem estrutural interpretativa integrada (ISM-DEMATEL)	Suprimentos agronegócio	Segurança cibernética, IoT, Blockchain, Big data	Regenerar, Recondicionar, Remanufatura, Renovar, Otimizar, Reduzir, Reaproveitar, Reutilizar, Reciclar, Reparar, Manter, Repensar, Recuperar, Renovar, Prolongar, Remanufaturar, Redefinir, Reformar, Recusar
Mahroof <i>et al.</i> (2021)	Reino Unido	Modelagem estrutural interpretativa (ISM)	Suprimentos agronegócio	Drone, IoT, IA e Robôs	Regenerar, Compartilhar, Otimizar, Reduzir, Reaproveitar, Reutilizar, Ciclar, Reciclar, Trocar, Reposicionar
Kumar <i>et al.</i> (2021).	Índia	Modelagem Matemática, Delphi e ISM	Suprimentos agronegócio	IoT, Cyber- sistema físico , Cloud Computing, Big-data	Regenerar, Recusar, Compartilhar, Recondicionar, Remanufatura, Renovar
Mukherjee <i>et al.</i> (2021).	Índia	Processo hierárquico analítico (AHP)	Suprimentos agronegócio	Blockchain, IoT, Computação em Nuvem	Regenerar, Compartilhar, Otimizar, Loop, Virtualizar, Trocar
Fernandez <i>et al.</i> (2021)	Portugal	Revisão sistemática da literatura	Pós-colheita	IA, IoT, Automação, Cyber Segurança e Robótica	Regenerar, Otimizar, Reduzir, Ciclar, Reciclar, Repensar, Prolongar
Islam <i>et al.</i> (2022)	Australia	Revisão sistemática da literatura	Resíduos sólidos do agronegócio	Big data, RFID baseadas em sensores, Gêmeos Digitais, Manufatura Aditiva, IoT	Regenerar, Recondicionar, Remanufatura, Renovar, Reciclar
Kazancoglu <i>et al.</i> (2022)	Turquia	Revisão da literatura e Modelagem Estrutural Interpretativa (ISM)	Resíduos sólidos gestão resíduos	Big Data e IoT	Reduzir, Reaproveitar, Reutilizar
Chakrapani <i>et al.</i> (2022)	Cingapura	Revisão da literatura	Resíduos sólidos /biomateriais	Robôs, Manufatura Inteligente, Blockchain, Impressão 3D	Regenerar, Recusar, Reduzir, Reaproveitar, Reutilizar, Ciclar, Prolongar, Reposicionar
Mariatti <i>et al.</i> (2021)	Itália	Revisão da literatura, modelo híbrido de MCDM que combina o método Analytical Hierarchy Proces (AHP)	Resíduos sólidos /gestão resíduos	Big data, IoT, impressão 3D, manufatura aditiva, sistemas cibernéticos	Regenerar, Recusar, Otimizar, Reduzir, Reaproveitar, Reutilizar
Belaud <i>et al.</i> (2019)	França	Estudo de caso	Resíduos sólidos/biomateriais	Big Data, IoT	Ciclar, Repensar, Recuperar, Renovar
Krstić <i>et al.</i> (2022)	Itália	Métodos AHP e COBRA (tomada de decisão multicritério - MCDM, híbrido Analytical Hierarchy Process)	Logística 4.0 do agronegócio	IoT, Sistemas cibernéticos	Ciclar, Reciclar, Reparar, Repensar, Recuperar, Renovar, Prolongar
Skorobogatova <i>et al.</i> , (2023 *a)	Ucrânia	Abordagem analítica e exploratória, desenvolvimento modelos conceituais	Agronegócio / pós-colheita	Big data, IoT, Robôs, IA	Recondicionar, Remanufaturar, Renovar, Reduzir, Reciclar, Reparar, Repensar
Skorobogatova <i>et al.</i> , (2023 *b)	Ucrânia	"Revisão sistemática da literatura, revisões analíticas de	Agronegócio / pós-colheita	Big data, IoT	Reducir
Silva <i>et al.</i> , (2022)	Brasil	especialistas e métodos de análise e síntese"	Agronegócio / pós-colheita	Big Data, Robôs Autônomos, IoT, Computação na Nuvem, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada, Sistemas Cibernéticos Físicos e de Segurança, IA	Reducir, Reaproveitar, Reutilizar, Reciclar
Varella, (2022)	Brasil	Revisão sistemática da literatura e validação empírica com 45 startups de foodtech	Agricultura	Big Data, Robôs Autônomos, Simulação, IoT, Computação na Nuvem, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada, Sistemas Cibernéticos Físicos e Segurança, IA	Regenerar, Recusar, Compartilhar, Recondicionar, Remanufaturar, Renovar, Reduzir, Reciclar, Reparar, Repensar, Otimizar, Ciclar, Recuperar, Prolongar, Virtualizar, Trocar, Reposicionar

Fonte: Autora.

A Tabela 5 oferece uma síntese estruturada e informativa da relação intrínseca entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas fundamentais da economia circular, derivada da revisão da presente pesquisa. A tabela elenca as tecnologias como indústria 4.0, com as práticas da economia circular. Essa contextualização visa fornecer uma visão acessível das abordagens dos autores, com vistas ao setor de pós-colheita do agronegócio, os autores, a metodologia e os países de aplicação da pesquisa.

A revisão identificou 16 variáveis ligadas à economia circular e 10 variáveis relacionadas às tecnologias da indústria 4.0. Esses resultados orientaram a criação de um instrumento de pesquisa, posteriormente submetido a um estudo-piloto para avaliação, conforme a aplicação da metodologia destacado por Forza (2002).

2.5. COMO PROPOR UM FRAMEWORK PARA IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 QUE PROMOVA A ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE PÓS-COLHEITA DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO

Uma proposta inovadora de *framework* conceitual emerge da análise da literatura sobre a adoção de tecnologias da indústria 4.0 e de práticas circulares no âmbito do agronegócio, com foco específico no recebimento, beneficiamento e armazenagem de grãos. Essa abordagem se fundamenta nas recomendações substanciais da literatura, combinando perspectivas teóricas com considerações práticas, visando à máxima eficácia no contexto pós-colheita.

O *framework* proposto, representado na Figura 8, é uma sinergia de tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 e práticas circulares, entrelaçadas para otimizar os processos relacionados ao recebimento e ao processamento de grãos e à sua armazenagem. Esse sistema de framework se baseia em informações provenientes da revisão sistemática da literatura, da análise de dados, culminando em saídas tangíveis por meio de painéis intuitivos. Tais painéis fornecem uma plataforma para a tomada de decisões, abrangendo tanto estratégias quanto operações diárias, transformando dados em oportunidades acionáveis para impulsionar a eficiência e a sustentabilidade no pós-colheita (Winkler, 2021).

O *framework* conceitual proposto para impulsionar a economia circular, mediante a adoção das tecnologias habilitadoras, se desdobra em sete passos. Inicia-se com a implementação da Internet das Coisas (IoT), visando à coleta automatizada de dados por meio de sensores estrategicamente posicionados. Em seguida, ocorre o processamento desses dados por meio da utilização de tecnologias de Nuvem, seguido pelo emprego de *Big Data* aliado a *Analytics* para análises aprofundadas. A etapa subsequente abrange a Manufatura Aditiva, em

conjunto com a RFID (Radio-Frequency Identification), seguida da implementação de robustos Sistemas de Cibersegurança.

À medida que foi proposto o *framework*, a Inteligência Artificial (IA) e o Aprendizado de Máquina (ML) se destacam, proporcionando uma camada de automação e otimização avançada. Finalmente, para alcançar a plenitude da integração, a incorporação estratégica de Manufatura Aditiva e de Robôs Autônomos se consolida como o último passo. Essa sequência lógica é cuidadosamente projetada com base nas interpretações extraídos da literatura estudada, representando uma abordagem otimizada para o *framework* destinado ao pós-colheita do agronegócio.

- 1) Internet das Coisas (IoT) — coleta de dados automatizada com o uso de sensores: para iniciar a coleta de dados, é fundamental obter visibilidade imediata e dados de qualidade. A utilização de sensores ligados à IoT pode ser implementada em máquinas, silos e veículos. Dada a frequência de adoção e os benefícios imediatos, iniciar com a IoT é algo estratégico. Sensores e dispositivos conectados oferecem coleta de dados em tempo real, o que otimiza as operações de pós-colheita (Sharma *et al.*, 2021).
- 2) Uso de dados em nuvem: migração para a nuvem considerando a frequência observada na literatura. A nuvem fornece escalabilidade e armazenamento, facilita o acesso remoto e permite o compartilhamento eficaz de dados. Isso cria a base para análises futuras (Kumar *et al.*, 2021).
- 3) Big Data + Analytics: com a base estabelecida pela IoT e pela nuvem, a implementação de *Big Data* pode ocorrer logo. A análise de grandes volumes de dados se torna possível, oferecendo análises para aprimorar a eficiência operacional. O uso de Analytics sobre dados em nuvem permite descobertas para otimizar operações e identificar áreas de melhoria (Belaud *et al.*, 2019).
- 4) Manufatura Aditiva / RFID: a integração de tecnologias de manufatura aditiva e RFID pode ocorrer em paralelo com a Big Data. Isso permite uma abordagem equilibrada para a automação de processos e o rastreamento de produtos, otimizando sua eficiência (Chakrapani *et al.*, 2022).
- 5) Sistemas de Cyber Segurança: a segurança cibernética é uma consideração crítica em qualquer fase da transformação digital. Implementar sistemas cibernéticos de segurança, em conjunto com outras tecnologias, garante a proteção contínua dos dados, estabelece robustas medidas de segurança cibernética, protege dados sensíveis e garante a confiabilidade da arquitetura (Fernandez *et al.*, 2021).

- 6) Implementação de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina (ML): com os dados consolidados e a segurança garantida, a introdução de IA e ML torna-se o próximo passo lógico. Essas tecnologias podem aprimorar a previsão de demanda, a otimização de processos e a tomada de decisões, à medida que dados históricos são acumulados na nuvem, para análises preditivas; assim, a automação torna-se eficaz (Mahroof *et al.*, 2021).
- 7) Robôs Autônomos: finalizando com robôs autônomos e drones, a operação física pode ser otimizada. Essas tecnologias são impulsionadas por dados precisos e processos estabelecidos nas fases anteriores (Chakrapani *et al.*, 2022).

Essa sequência visa equilibrar os benefícios com uma abordagem gradual e sustentável para a transformação digital. Cada etapa é fundamentada na literatura, minimizando riscos e garantindo seu progresso. A proposta de *framework* conceitual delineada visa estabelecer uma conexão estreita entre as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 e as práticas circulares no contexto do pós-colheita do agronegócio. Cada passo estratégico desse *framework* é projetado para promover a eficiência operacional e a sustentabilidade, alinhando-se às diversas práticas circulares da economia circular.

Tabela 5 - Quadro de tecnologias propostas para gerar práticas circulares

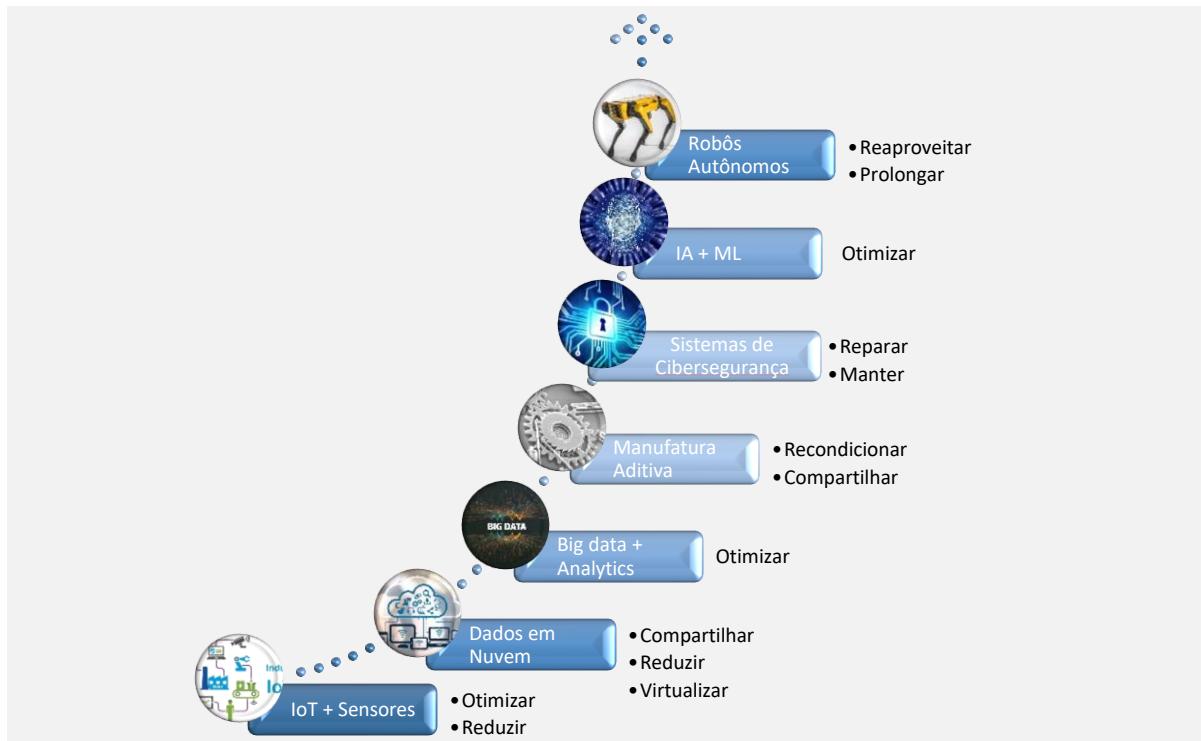
Tecnologias	Estratégia	Práticas
Internet das Coisas (IoT), Coleta de Dados Automatizada com Uso de Sensores	Início com a coleta de dados, para obter visibilidade imediata e dados de qualidade	Otimizar operações por meio da coleta em tempo real, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência
Uso de Dados em Nuvem Edge	Migração para a nuvem, fornecendo escalabilidade e armazenamento	Facilitar o compartilhamento de dados, promovendo as práticas de compartilhar e reduzir a necessidade de recursos físicos, facilitando a prática de virtualizar
Big Data + Analytics	Implementação de Big Data após a IoT e a nuvem, para análises	Contribuir para a prática de otimização, identificando áreas de melhoria e eficiência operacional
Manufatura Aditiva / RFID	Integração simultânea de manufatura aditiva e RFID	Otimizar a eficiência, contribuindo para práticas circulares de recondicionar e compartilhar

Sistemas de Cibersegurança	Implementação de sistemas cibernéticos de segurança em conjunto com outras tecnologias	Garantir a proteção contínua dos dados contribui para práticas circulares de reparar e manter, prolongando a vida útil dos sistemas
Implementação de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquinas (ML):	Introdução de IA e ML com dados consolidados e segurança garantida	A automação avançada promovida por essas tecnologias contribui para práticas circulares de otimização
Robôs Autônomos	Finalização com robôs autônomos e drones	A otimização física das operações contribui para práticas circulares de reaproveitar e prolongar a vida útil dos equipamentos

Fonte: Autora.

Essa sequência foi elaborada e a fim de garantir uma transição suave e sustentável para a transformação digital no pós-colheita do agronegócio. Com base nos dados apresentados no quadro acima, foi concebida a Figura 8, que delinea a sequência de adoção de tecnologias habilitadoras, visando desenvolver o *framework* conceitual das práticas circulares.

Figura 8 - Sequência de adoção de tecnologias habilitadoras para propor o framework conceitual das práticas circulares



Fonte: Autora.

Essa representação visual tem como objetivo oferecer uma compreensão das tecnologias, práticas e da sequência de adoção, proporcionando e facilitando a análise das interações entre esses elementos no contexto proposto.

A revisão de literatura obtida nas bases digitais apresenta informações sobre o agronegócio, porém não há dados específicos sobre o pós-colheita, o recebimento, o beneficiamento e a armazenagem de grãos para embasar a organização do modelo conceitual a ser proposto. Diante disso, o *framework* conceitual foi pensado em módulos específicos, com vistas a atender aos processos do setor de pós-colheita: recebimento, beneficiamento e armazenagem de grãos, além da gestão abrangente de todo o sistema, estruturando essa divisão.

- a) Módulo de Processamento de dados do recebimento, beneficiamento e armazenagem de grãos e gestão integrada.
 - Internet das Coisas (IoT) e Coleta de Dados: Utilização de sensores IoT para a coleta automatizada de dados no momento do recebimento. Os sensores monitoram a qualidade dos grãos, sua temperatura, umidade e outras variáveis essenciais.
 - Integração com a nuvem para armazenamento.
 - Sistemas de Cyber Segurança: Implementação de sistemas de cibersegurança para garantir a integridade dos dados do recebimento. Proteção contra ameaças cibernéticas, para manter a confidencialidade e a segurança dos dados.
 - Uso de Dados em Nuvem: Migração e armazenamento de dados na nuvem para facilitar o acesso e o compartilhamento.
 - Big Data + Analytics: Análise avançada de dados do recebimento para ideias de melhoria contínua. Monitoramento em tempo real, para a identificação de condições ideais de armazenamento.
 - Implementação de Inteligência Artificial (IA): Utilização de IA para a otimização de processos e a tomada de decisões estratégicas no recebimento. Análise preditiva para identificar padrões e melhorias contínuas.
 - Manufatura Aditiva / RFID: Tecnologias RFID para rastreamento e controle do beneficiamento. Manufatura aditiva para a produção de peças personalizadas e ferramentas otimizadas.
 - Simulação: Uso de simulação para o planejamento estratégico e a análise de cenários futuros. Antecipação de demandas e otimização de recursos.
 - Realidade Aumentada: Implementação de realidade aumentada para o treinamento de equipe e o suporte à tomada de decisões.

b) Módulo de Práticas Circulares:

Compreende estratégias de Economia Circular a partir da incorporação de práticas circulares em todo o processo, incluindo a reutilização de embalagens; a otimização de recursos, como resíduos do processo, reciclagem e reutilização de resíduos; a troca de posição de grãos, para reduzir custo logístico com plantas/unidades de beneficiamento; o manejo integrado de pragas, para otimizar recursos químicos; a mitigação de desperdício, para reduzir consumo de recursos naturais; e a regeneração de resíduos, para a produção de embalagens, incentivando os processos de ciclar e reciclar.

Esse *framework* modular visa atender, de maneira específica, às necessidades de cada fase do processo, desde o recebimento de grãos até a gestão integrada. A integração de tecnologias da Indústria 4.0 possibilita uma abordagem holística, contribuindo para a eficiência operacional e para práticas sustentáveis.

Sendo assim, iniciou-se o desenho específico da estrutura a ser proposta em fases para o framework:

Fase 1 - Componentes Principais:

COMPONENTES PRINCIPAIS	Identificação de necessidades críticas	Automação e robótica
CENÁRIOS PÓS-COLHEITA	Mapeamento das áreas que exigem maior atenção	Implementação de drones, robôs autônomos e automação em armazéns
PAÍS BRASIL	Desenvolvimento de dispositivos	Simulação digital e Gêmeos digitais
SETOR AGRONEGÓCIO	Investimento em AIoT, sensores e Edge Computing	Uso extensivo de modelos virtuais para simulação

Fase 2 - Interfaces

INTERFACES	Desenvolvimento de interface de usuários	Integração de sistemas
CENÁRIOS PÓS-COLHEITA	Criação de sistemas intuitivos e gráficos	Conexão das várias partes envolvidas no framework
PAÍS BRASIL	Transformação e armazenamento de dados	
SETOR AGRONEGÓCIO	Implementação de big data e análises preditivas	

Fase 3 : Padrões



2.5.1. Framework conceitual proposto para promover práticas circulares integradas às tecnologias da indústria 4.0 no pós-colheita do agronegócio

Superar as barreiras para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 é um desafio, especialmente em meio à abundância de dados gerados por essas tecnologias. Uma análise criteriosa identifica uma série de obstáculos, que incluem desde a falta de conhecimento sobre essas tecnologias até a carência de infraestrutura adequada (Kumar *et al.*, 2021). Essa minuciosa exploração oferece observações para os *stakeholders* da cadeia de abastecimento agrícola, enriquecendo a compreensão da complexidade do problema e contribuindo diretamente para o *framework* proposto.

As interpretações fornecidas por Sharma *et al.* (2021) sobre a adoção de tecnologias da indústria 4.0 no agronegócio, como Inteligência Artificial, IoT e Big Data, também foram considerados para o desenvolvimento do *framework* proposto nesta tese. Sua pesquisa identifica dez facilitadores essenciais, revelando relações hierárquicas e de causa-efeito por meio de uma abordagem de modelagem. As implicações práticas de implementação das tecnologias são orientadas aos profissionais e formuladores de políticas na implementação eficaz das tecnologias, fortalecendo a sustentabilidade e contribuindo diretamente para o framework de tecnologias da Indústria 4.0 e princípios de economia circular na pós-colheita do agronegócio.

O estudo de Fernandez *et al.* (2021) concentra-se na superação dos desafios de sustentabilidade no negócio agroindustrial, propondo soluções inovadoras para a gestão de resíduos agroindustriais, em linha com a economia circular. Destaca-se a importância da capacitação dessas empresas para a adoção de práticas inovadoras, integrando a Indústria 4.0. A cibersegurança é enfatizada como elemento para criar confiança na adoção de tecnologias digitais.

Além disso, o estudo de Krstić *et al.* (2022) sobre a integração da economia circular com a Logística 4.0 no setor agroalimentar também foi considerado para a construção do *framework*, que busca a adoção eficaz das tecnologias da Indústria 4.0 na pós-colheita do agronegócio. Suas pesquisas destacam a importância dessas tecnologias no planejamento estratégico das atividades logísticas baseadas na Indústria 4.0 e na economia circular agroalimentar.

Dentro desse contexto, na busca em desenvolver uma proposta de solução para adoção dos serviços integrados, aprimorados a partir das análises, contribuições e validação, elaborou-se a proposta do framework para o setor de pós-colheita do agronegócio. A pesquisa busca não apenas superar desafios específicos, mas também fornecer estrutura abrangente para a implementação prática de tecnologias inovadoras, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0 e economia circular.

Segundo Johnson e Deutsch (1993) sobre como projetar estruturas de framework, o estudo fornece uma base teórica para a proposição de um novo framework para a implantação de tecnologias da Indústria 4.0 que promovam a economia circular no setor de pós-colheita brasileiro. Ao explorar padrões de projeto, Johnson e Deutsch destacam a importância de soluções reutilizáveis e bem documentadas para problemas recorrentes em sistemas orientados a objetos. O framework proposto se inspira nesses princípios, buscando não apenas aplicar padrões de projeto estabelecidos, mas também os expandir para abordar desafios atuais. A adoção desses conceitos permite a proposta de um framework que promove flexibilidade, manutenção e reutilização, características essenciais para a evolução contínua de sistemas.

O modelo 'Componentes Principais, Interfaces, Padrões' foi utilizado para descrever a sequência lógica na implementação de soluções de IoT, Indústria 4.0 e transformação digital. Este framework inicia com 'Componentes Principais', que são os elementos físicos e tecnológicos fundamentais. Segue-se 'Interfaces', que facilitam a comunicação e interação entre esses componentes. Por fim, 'Padrões' referem-se às normas e protocolos que garantem a interoperabilidade e a consistência das ações (Johnson *et al.*, 1993).

Para elucidar cada elemento incorporado ao framework conceitual para o pós-colheita, que integra as tecnologias da Indústria 4.0, é fundamental compreender o papel de cada categoria proposta. Estas categorias, que abrangem Componentes Principais, Interfaces e Padrões, serão detalhadamente exploradas para revelar como cada uma contribui para a eficácia do modelo.

Componentes Principais:

- ✓ Definição: Este item refere-se aos elementos físicos e digitais que compõem o ambiente da Indústria 4.0. Inclui dispositivos IoT, sensores, máquinas conectadas, robôs autônomos, gêmeos digitais e outros objetos inteligentes, perpassando detalhes de como os dispositivos físicos e digitais interagem entre si. Destaca-se a importância da conectividade, da segurança e da coleta de dados em tempo real para informar processos de tomada de decisão.

Interfaces:

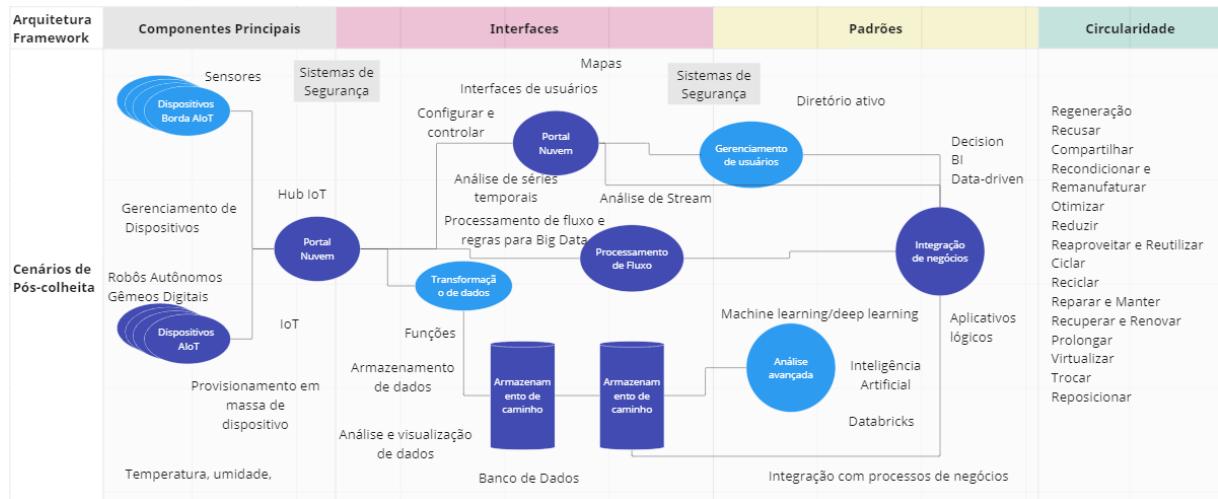
- ✓ Definição: Neste contexto, "interfaces" representam os conceitos e estratégias subjacentes à implementação da Indústria 4.0. Isso inclui portal em nuvem, transformação dos dados, processamento dos dados, big data, interfaces e mapas. Destaca-se como esses dados são processados, geram informações e são aplicados para otimizar operações.

Padrões:

- ✓ Definição: Representa as atividades práticas e operacionais desencadeadas pela implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Envolve processos automatizados, manufatura aditiva, *machine learning*, *deep learning*, inteligência artificial, aplicativos lógicos, logística inteligente e outras ações orientadas pela digitalização. Essas ações transformam a maneira como as operações são executadas. As automações reduzem o tempo de produção e melhoram a eficiência da cadeia, gerando informação para a tomada de decisão por meio de Decision, Power BI e Data-driven.

É fundamental manter a interconexão entre componentes principais, interfaces e padrões, destacando como essa sinergia impulsiona a transformação digital na perspectiva da Indústria 4.0, como proposto na figura de Framework integrado para o pós-colheita.

Figura 9 - Framework para o pós-colheita



Fonte: Elaborado pela autora.

A figura revela a proposta de um *framework*, elaborado para impulsionar a economia circular na fase pós-colheita do agronegócio. Essa visão estratégica da adoção das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 delineia um processo fluido, iniciando com a coleta de dados como entrada fundamental. À medida que avança, esse *framework* se distingue pela sua capacidade de gerar informações decisivas e, notavelmente, de fomentar a circularidade.

Esse conceito não apenas visa, efetivamente, promover as práticas da economia circular na pós-colheita do agronegócio, mas também oferece uma abordagem sistemática e integrada para medir a evolução dessa circularidade. Uma métrica proposta para avaliar tal evolução consiste na análise da eficiência na reutilização, remanufatura e reciclagem de materiais, proporcionando uma base tangível para mensurar o impacto positivo dessas práticas na cadeia de valor agrícola.

A seguir, é apresentada uma proposta para explorar os indicadores específicos para cada prática circular no contexto da operação do setor de pós-colheita do agronegócio, possibilitando a evolução da circularidade, obtidos através das análises entre a revisão sistemática e as demandas do pós-colheita:

- ✓ Regenerar: indicador de qualidade do solo após a utilização de práticas regenerativas, como o uso de resíduos orgânicos, como palha, caule e folhas retiradas do processo de pós-colheita.
- ✓ Recusar: percentual de grãos recusados devido à sua não conformidade com padrões de qualidade, como umidade excessiva ou presença de contaminantes.
- ✓ Compartilhar: índice de compartilhamento de infraestrutura de armazenagem entre diferentes produtores, promovendo a utilização dos recursos.

- ✓ Recondicionar/Remanufaturar: taxa de recondicionamento de maquinário de beneficiamento e transporte de grãos.
- ✓ Renovar: percentual de renovação de instalações de armazenagem para garantir eficiência e segurança.
- ✓ Otimizar: eficiência operacional na utilização de energia durante o beneficiamento e a armazenagem, medida pelo consumo, por tonelada, de grãos processados.
- ✓ Reduzir: redução do desperdício de grãos durante o processo de beneficiamento, quantificado pela diferença entre a quantidade de grãos recebida e a quantidade final armazenada.
- ✓ Reaproveitar/Reutilizar: taxa de reutilização de embalagens de transporte de grãos e insumos.
- ✓ Ciclar: eficiência na gestão dos ciclos de armazenamento, avaliada pela otimização do tempo de permanência dos grãos.
- ✓ Reciclar: percentual de resíduos da operação (como embalagens) que são reciclados.
- ✓ Reparar/Manter: taxa de manutenção preventiva e reparo de equipamentos de beneficiamento e armazenagem.
- ✓ Recuperar/Renovar: percentual de grãos recuperados de lotes com problemas de qualidade após processos de limpeza e separação.
- ✓ Prolongar: extensão da vida útil de equipamentos de armazenagem por meio de práticas de manutenção.
- ✓ Virtualizar: utilização de sistemas digitais para monitorar e otimizar os processos de recebimento, beneficiamento e armazenagem, reduzindo a necessidade de intervenção física.
- ✓ Trocar: eficiência na gestão de trocas de grãos entre produtores, para otimizar a distribuição e reduzir custos de transporte.
- ✓ Reposicionar: reconfiguração dos *layouts* e processos de armazenagem, para otimizar o uso do espaço e facilitar a movimentação de grãos.

Esses indicadores proporcionam uma visão abrangente da circularidade nas operações de pós-colheita do agronegócio, permitindo avaliar e melhorar práticas específicas para promover uma economia circular sustentável. O monitoramento da operação do pós-colheita, incluindo o recebimento, o beneficiamento e a armazenagem de grãos, pode se beneficiar do uso de variáveis de entrada específicas. Para a aplicação dos conceitos das tecnologias da Indústria 4.0 para atingir a circularidade do processo, diversas variáveis devem ser consideradas. Aqui, são listadas algumas delas:

(Continua)

Quadro 3: Monitoramento de dados do setor de pós-colheita

Sensores de Qualidade dos Grãos	Utilização de sensores para monitorar a qualidade dos grãos em termos de umidade, peso, tamanho e pureza, garantindo que apenas grãos de qualidade sejam processados e armazenados.	(Sharma et al., 2021), (Fernandez et al., 2021), (Krstić et al, 2022), (Mahroof et al., 2021), (Mariatti et al, 2021), (Kumar et al., 2021), (Mukherjee et al., 2021), (Islam et al., 2022)
Sensores Ambientais	Monitoramento das condições ambientais, como volume, temperatura e umidade, durante o recebimento e a armazenagem, para garantir condições ideais à preservação dos grãos e à prevenção de problemas como mofo e insetos.	(Sharma et al., 2021), (Fernandez et al., 2021), (Krstić et al, 2022), (Mahroof et al., 2021), (Mariatti et al, 2021), (Kumar et al., 2021), (Mukherjee et al., 2021), (Islam et al., 2022)
Sistemas de Identificação e Rastreamento	Implementação de sistemas de identificação por radiofrequência (RFID) ou códigos de barras para rastrear cada lote de grãos, desde o recebimento até o armazenamento, possibilitando a gestão da cadeia de suprimentos.	(Fernandez et al., 2021)
Automação no Beneficiamento	Uso de tecnologias de automação para o beneficiamento dos grãos, otimizando o processo e reduzindo desperdícios. Isso inclui a automação de máquinas de seleção, limpeza e classificação.	(Krstić et al., 2022)

(Conclusão)

Monitoramento em Tempo Real	Implementação de sistemas de monitoramento em tempo real, para acompanhar as operações e identificar rapidamente quaisquer desvios ou problemas nas condições dos grãos ou no processo.	(Sharma et al., 2021), (Mariatti et al, 2021), (Kumar et al., 2021), (Belaud et al. 2019), (Kazancoglu et al, 2022)
Sensores de Armazenagem Inteligente	Utilização de sensores inteligentes nos silos de armazenamento, para monitorar níveis de grãos, condições de armazenamento e detectar possíveis problemas, como infestações de pragas.	(Sharma et al., 2021), (Fernandez et al., 2021), (Krstić et al, 2022), (Mahroof et al., 2021), (Mariatti et al, 2021), (Kumar et al., 2021), (Mukherjee et al., 2021), (Islam et al., 2022)

Análise de Dados Avançada	Aplicação de técnicas avançadas de análise de dados, para identificar padrões, prever demandas e otimizar o uso de recursos, contribuindo para a eficiência do processo e para a redução de desperdícios.	(Fernandez <i>et al.</i> , 2021), (Mahroof <i>et al.</i> , 2021)
Integração de Sistemas	Integração de diferentes sistemas, por meio de plataformas digitais, permitindo uma visão holística e coordenada de toda a operação do pós-colheita.	(Sharma et. at., 2021), (Kumar <i>et al.</i> , 2021), (Mukherjee <i>et al.</i> , 2021), (Chakrapani <i>et al.</i> , 2022)
Uso de Tecnologias de Comunicação	Implementação de tecnologias de comunicação avançadas, como a Internet das Coisas (IoT), para permitir a comunicação entre dispositivos e sistemas, facilitando sua coordenação e controle.	(Sharma <i>et al.</i> , 2021), (Fernandez <i>et al.</i> , 2021), (Krstić et al, 2022), (Mahroof <i>et al.</i> , 2021), (Mariatti et al, 2021), (Kumar <i>et al.</i> , 2021), (Mukherjee <i>et al.</i> , 2021), (Islam <i>et al.</i> , 2022)
Monitoramento da Eficiência Energética	Avaliação do consumo de energia em todas as etapas do processo de pós-colheita, para identificar oportunidades de eficiência energética e reduzir o impacto ambiental.	(Fernandez <i>et al.</i> , 2021)

Fonte: Autora.

Essas variáveis de entrada, quando monitoradas e gerenciadas de forma integrada, podem contribuir para a eficiência operacional, a redução de desperdícios e os avanços em direção a práticas circulares no pós-colheita do agronegócio.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Nesta seção, são abordados os métodos de pesquisa selecionados para a elaboração deste trabalho, juntamente com os procedimentos adotados e as ferramentas utilizadas para a coleta de dados. O desenvolvimento da pesquisa foi estruturado em quatro etapas principais: definição da pesquisa, delineamento da pesquisa, coleta de dados e análise de dados.

Primeiramente, na definição da pesquisa, foram estabelecidos os objetivos e as questões de pesquisa que guiaram todo o estudo. Em seguida, no delineamento da pesquisa, foram escolhidos os métodos e estratégias mais adequados para alcançar os objetivos propostos. A terceira etapa, coleta de dados, envolveu a utilização de ferramentas e técnicas para reunir as informações necessárias. Finalmente, na análise de dados, os dados coletados foram examinados e interpretados para responder às questões de pesquisa e atingir os objetivos do estudo.

Como é possível observar, a seção está dividida em quatro etapas: definição do problema, delineamento da pesquisa, coleta de dados e análise dos dados.

3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O primeiro passo para a aplicação dos métodos de pesquisa consiste na definição do problema e na estratégia adotada para responder às questões levantadas. Esse processo permite alcançar os objetivos do estudo de forma direcionada e eficaz, buscando minimizar a interferência subjetiva do pesquisador (Seltiz; Wrightsman; Cook, 1976).

Neste trabalho, o problema de pesquisa é: "Como as tecnologias da Indústria 4.0 impulsionam a adoção de práticas de economia circular no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro?"

Para o início da investigação, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo de documentar o estado atual das tecnologias da Indústria 4.0 e identificar a adoção de práticas da economia circular no setor de pós-colheita do agronegócio. Ademais, a revisão teve como propósito, também, obter variáveis para a elaboração do questionário que compõe este estudo (a ser apresentado posteriormente), bem como identificar lacunas para a abordagem do tema.

Para a etapa de coleta das informações, a autora utilizou as bases de dados Scopus (<http://scopus.com/>) – Emerald, Scielo, Science Direct, Taylor & Francis e Wiley; escolhidas por seu teor científico, bem como pelos conteúdos de áreas relacionadas aos objetivos do presente estudo. A seguir, o Quadro 4 apresenta as palavras utilizadas para o protocolo de busca.

(Continua)

Quadro 4 – Quadro de palavras utilizadas para o protocolo de busca

nº	Idioma	Palavra 1	Palavra 2	Palavra 3	Palavra 4	Scopus (05.01.2023)
1	Inglês	"circular economy"	"agribusiness"	"post-harvest"		0
2	Inglês	"circular economy"	"agribusiness"			43
3	Inglês	"circular economy"	"post-harvest"			27
4	Inglês	"enabling technologies"	"agribusiness"	"post-harvest"		0
5	Inglês	"industry 4.0"	"agribusiness"	"post-harvest"		0
6	Inglês	"enabling technologies"	"agribusiness"			4
7	Inglês	"industry 4.0"	"post-harvest"			4
8	Inglês	"iot"	"post-harvest"			20
9	Inglês	"internet of things"	"post-harvest"			22
10	Inglês	"big data"	"post-harvest"			10
11	Inglês	"artificial intelligence"	"post-harvest"			33
12	Inglês	"ai"	"post-harvest"			38
13	Inglês	"cloud"	"post-harvest"			22
14	Inglês	"cloud computing"	"post-harvest"			3
15	Inglês	"additive manufacturing"	"post-harvest"			0
16	Inglês	"advanced manufacturing"	"post-harvest"			0
17	Inglês	"machine learning"	"post-harvest"			75
18	Inglês	"machine to machine"	"post-harvest"			0
19	Inglês	"cyber physical"	"post-harvest"			3
20	Inglês	"cyber physical system"	"post-harvest"			3
21	Inglês	"robot"	"post-harvest"			104
22	Inglês	"digital twin"	"post-harvest"			3
23	Inglês	"data mining"	"post-harvest"			11
24	Inglês	"augmented reality"	"post-harvest"			2
25	Inglês	"virtual reality"	"post-harvest"			4
26	Inglês	"cyber security"	"post-harvest"			0
27	Inglês	"Algorithm"	"post-harvest"			167
28	Inglês	"circular economy"	"industry 4.0"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
29	Inglês	"circular economy"	"enabling technologies"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
30	Inglês	"circular economy"	"industry 4.0"	"post-harvest"		1
31	Inglês	"circular economy"	"enabling technologies"	"agribusiness"		0
32	Inglês	"circular economy"	"enabling technologies"	"post-harvest"		0
33	Inglês	"circular economy"	"iot"	"agribusiness"	"post-harvest"	0

34	Inglês	"circular economy"	"internet of things"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
35	Inglês	"circular economy"	"big data"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
36	Inglês	"circular economy"	"artificial intelligence"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
37	Inglês	"circular economy"	"ai"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
38	Inglês	"circular economy"	"cloud"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
39	Inglês	"circular economy"	"cloud computing"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
40	Inglês	"circular economy"	"additive manufacturing"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
41	Inglês	"circular economy"	"advanced manufacturing"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
42	Inglês	"circular economy"	"machine learning"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
43	Inglês	"circular economy"	"machine to machine"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
44	Inglês	"circular economy"	"cyber physical"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
45	Inglês	"circular economy"	"cyber physical system"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
46	Inglês	"circular economy"	"robot"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
47	Inglês	"circular economy"	"digital twin"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
48	Inglês	"circular economy"	"data mining"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
49	Inglês	"circular economy"	"augmented reality"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
50	Inglês	"circular economy"	"virtual reality"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
51	Inglês	"circular economy"	"cyber security"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
52	Inglês	"circular economy"	"Algorithm"	"agribusiness"	"post-harvest"	0
53	Inglês	"circular economy"	"industry 4.0"	"post-harvest"		1
54	Inglês	"circular economy"	"enabling technologies"	"post-harvest"		0
55	Inglês	"circular economy"	"iot"	"post-harvest"		0
56	Inglês	"circular economy"	"internet of things"	"post-harvest"		0
57	Inglês	"circular economy"	"big data"	"post-harvest"		0
58	Inglês	"circular economy"	"artificial intelligence"	"post-harvest"		0
59	Inglês	"circular economy"	"ai"	"post-harvest"		0
60	Inglês	"circular economy"	"cloud"	"post-harvest"		0
61	Inglês	"circular economy"	"cloud computing"	"post-harvest"		0
62	Inglês	"circular economy"	"additive manufacturing"	"post-harvest"		0
63	Inglês	"circular economy"	"advanced manufacturing"	"post-harvest"		0
64	Inglês	"circular economy"	"machine learning"	"post-harvest"		0
65	Inglês	"circular economy"	"machine to machine"	"post-harvest"		0
66	Inglês	"circular economy"	"cyber physical"	"post-harvest"		0
67	Inglês	"circular economy"	"cyber physical system"	"post-harvest"		0
68	Inglês	"circular economy"	"robot"	"post-harvest"		0
69	Inglês	"circular economy"	"digital twin"	"post-harvest"		0

70	Inglês	"circular economy"	"data mining"	"post-harvest"	0
71	Inglês	"circular economy"	"augmented reality"	"post-harvest"	0
72	Inglês	"circular economy"	"virtual reality"	"post-harvest"	0
73	Inglês	"circular economy"	"cyber security"	"post-harvest"	0
74	Inglês	"circular economy"	"Algorithm"	"post-harvest"	0
75	Inglês	"circular economy"	"industry 4.0"	"agribusiness"	4
76	Inglês	"circular economy"	"enabling technologies"	"agribusiness"	0
77	Inglês	"circular economy"	"iot"	"agribusiness"	0
78	Inglês	"circular economy"	"internet of things"	"agribusiness"	0
79	Inglês	"circular economy"	"big data"	"agribusiness"	0
80	Inglês	"circular economy"	"artificial intelligence"	"agribusiness"	0
81	Inglês	"circular economy"	"ai"	"agribusiness"	0
82	Inglês	"circular economy"	"cloud"	"agribusiness"	0
83	Inglês	"circular economy"	"cloud computing"	"agribusiness"	0
84	Inglês	"circular economy"	"additive manufacturing"	"agribusiness"	0
85	Inglês	"circular economy"	"advanced manufacturing"	"agribusiness"	0
86	Inglês	"circular economy"	"machine learning"	"agribusiness"	0
87	Inglês	"circular economy"	"machine to machine"	"agribusiness"	0
88	Inglês	"circular economy"	"cyber physical"	"agribusiness"	0
89	Inglês	"circular economy"	"cyber physical system"	"agribusiness"	0
90	Inglês	"circular economy"	"robot"	"agribusiness"	1
91	Inglês	"circular economy"	"digital twin"	"agribusiness"	0
92	Inglês	"circular economy"	"data mining"	"agribusiness"	0
93	Inglês	"circular economy"	"augmented reality"	"agribusiness"	0
94	Inglês	"circular economy"	"virtual reality"	"agribusiness"	0
95	Inglês	"circular economy"	"cyber security"	"agribusiness"	0
96	Inglês	"circular economy"	"Algorithm"	"agribusiness"	0
97	Inglês				
Total					605

Fonte: Autora.

O quadro referente às terminologias adotadas no protocolo de busca apresenta uma compilação das palavras-chave selecionadas para a obtenção dos estudos nas bases de dados. Essas palavras-chave foram escolhidas com o intuito de contemplar uma gama de variações relacionadas às tecnologias da Indústria 4.0 e aos princípios da economia circular, assegurando uma cobertura abrangente e precisa durante os processos de busca.

Os critérios de inclusão e de exclusão dos artigos para sua seleção são demonstrados no Quadro 5.

Quadro 5 - Critérios de inclusão e de exclusão

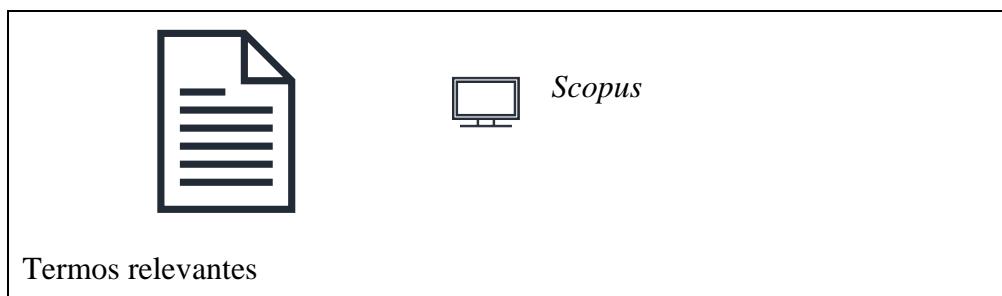
Inclusão	I1 – Publicação na base Scopus I2 – Publicações em Inglês I3 – Publicações entre 2016 e 2024 I4 – Publicações de relevância do estudo I5 – Publicações com a presença de palavras-chaves nos títulos, resumos e palavras-chaves (em um deles)
Exclusão	E1 – Publicações em <i>conference, conference review, books, book chapter, letter and short survey</i> E2 – Publicações não disponíveis para a revisão completa E3 – Limitada a documentos do tipo artigos e reviews E4 – Artigos que não fazem parte do agronegócio E5 – Artigos que não relacionam tecnologias da indústria 4.0 com a economia circular

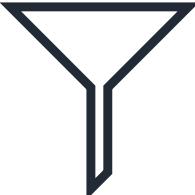
Fonte: Autora.

O quadro acima delinea os critérios estabelecidos para viabilizar o acesso aos estudos nas bases de dados. Esses critérios foram escolhidos para garantir uma abordagem seletiva e coerente na identificação dos estudos pertinentes durante o processo de busca nos bancos de dados. Na busca inicial, foram identificados 605 trabalhos relevantes, conforme apresentado na Figura 9. No entanto, para garantir a qualidade da revisão, foram aplicados os critérios de exclusão supramencionados, restringindo a análise somente a artigos acadêmicos publicados em periódicos. Após a aplicação desses filtros e a exclusão dos trabalhos duplicados, foram considerados 14 artigos relevantes para este estudo.

(Continua)

Figura 10 - Etapas para a seleção dos trabalhos



	<p>605 trabalhos relacionados com as tecnologias da indústria 4.0 e as práticas da economia circular dentro do agronegócio</p> <p>455 documentos removidos como duplicatas</p> <p>150 trabalhos publicados em periódicos (após eliminação dos repetidos)</p> <p>15 trabalhos relevantes após a etapa de análise de conteúdo</p>
---	---

Fonte: Autora.

Os 15 pesquisas relevantes identificados na revisão sistemática foram separados de acordo com o processo abordado: setor de pós colheita do agronegócio, busca de artigos com base nos conjuntos de palavras chaves, utilizado a base Scopus para identificar a presença de palavras chaves nos títulos, resumos e palavras chaves; a busca foi restringida (limitada) a documentos do tipo artigos e reviews; total bruto de 605 documentos; foram removidos 455 documentos excluídos e realizada leitura, identificação e seleção dos demais artigos dentro do agronegócio que relacionam as tecnologias da indústria 4.0 com a economia circular.

A partir da revisão, foram identificadas 16 variáveis relacionadas à economia circular e outras 10 variáveis que dizem respeito às tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 (conforme representado na figura). Com base nos resultados, foi elaborado um instrumento de pesquisa, submetido a um estudo-piloto para avaliação (Forza, 2002).

A partir dos trabalhos selecionados, foi realizada a análise de conteúdo, seguindo a metodologia, uma etapa fundamental para a definição e o refinamento dos construtos teóricos que estruturaram esta pesquisa.

3.2. DELINEAMENTO DO MÉTODO DE PESQUISA

A etapa de delineamento desempenha um papel fundamental na pesquisa e só pode ser iniciada após a definição do problema. Uma vez que o problema é identificado, o delineamento da pesquisa auxilia o pesquisador na abordagem e escopo das soluções a serem desenvolvidas (Mitchell; Jolley, 2012).

O estudo proposto é classificado da seguinte forma: a) abordagem quali-quantitativa; b) natureza não experimental; c) finalidade aplicada; d) objetivos – exploratório e descritivo; e) procedimento bibliográfico e estudo de campo.

O presente trabalho, a partir do problema traçado – promover a economia circular através da adoção de tecnologias da indústria 4.0, foi classificado como exploratório e descritivo, uma vez que busca identificar as diferentes manifestações do problema e considerar diversos pontos de vista. A classificação da pesquisa como exploratória e descritiva permite uma maior familiaridade do pesquisador com o assunto abordado, além de possibilitar uma análise aprofundada das relações entre dois ou mais elementos (Eisenhardt, 1989).

A abordagem adotada neste trabalho considerou tanto os aspectos quantitativos quanto os qualitativos. Os dados coletados e analisados foram baseados em informações numéricas, permitindo a aplicação das ferramentas estatísticas selecionadas.

O trabalho se configura como uma pesquisa aplicada, cujo objetivo é aprofundar a análise das questões levantadas, considerando soluções viáveis para o mundo real. Dessa forma, elas contribuem para adicionar aspectos relevantes ao conhecimento nas áreas acadêmicas e empresariais (Eisenhardt; 1989).

Além disso, foram considerados os aspectos teóricos obtidos por meio da revisão da literatura, que embasaram o desenvolvimento da pesquisa. Essa abordagem combinada permite que o pesquisador reduza a distância entre os conceitos e os dados numéricos, possibilitando uma observação do problema sob a perspectiva organizacional, sem perder de vista a lacuna teórico-conceitual (Bryman, 2003).

A metodologia empregada neste estudo é de natureza afirmatória e confirmatória, pois fundamenta-se na observação e análise de dados coletados para derivar generalizações e inferências que extrapolam as informações contidas nas partes examinadas. O enfoque indutivo visa estabelecer uma compreensão abrangente e fundamentada na realidade, buscando uma relação substantiva entre os fenômenos estudados, ao invés de meras semelhanças casuais. A opção pela abordagem dedutiva foi descartada, uma vez que este estudo não se propõe a realizar argumentações matemáticas ou partir de premissas gerais para chegar a conclusões específicas (Eisenhardt, 1989).

A pesquisa é caracterizada como organizacional, visto que se concentra na investigação e análise de fenômenos relacionados ao contexto e dinâmicas internas de uma organização específica. Essa abordagem permite uma compreensão aprofundada dos processos, práticas e interações dentro do ambiente organizacional, contribuindo para uma visão detalhada e contextualizada dos resultados obtidos. Nesse tipo de pesquisa, ocorre uma abordagem

fundamentada em problemas concretos e questões práticas que detêm relevância para as empresas associadas ao segmento pós-colheita do agronegócio brasileiro.

É pertinente ressaltar que pesquisas organizacionais são notáveis devido à adoção de uma perspectiva holística, conforme destacado por Bryman (2003). Isso implica uma análise integral, considerando diversos aspectos e interações dentro do contexto organizacional, para uma compreensão abrangente e aprimorada das dinâmicas envolvidas.

3.3. COLETA DE DADOS

No que diz respeito ao método utilizado, este trabalho empregou uma pesquisa do tipo *Survey* nas empresas do setor pós-colheita do Agronegócio no Brasil. O método *Survey* é uma ferramenta utilizada por pesquisadores que desejam coletar dados precisos e confiáveis em estudos quantitativos, sendo desenvolvido em três etapas distintas, como descrito por Forza (2002): (1) delimitação do universo a ser pesquisado, para determinar o tamanho da amostra; (2) realização de um estudo-piloto, para avaliar a eficácia do instrumento de pesquisa; (3) coleta de dados de campo na amostra delimitada e posterior análise, com ferramentas estatísticas.

Para Forza (2002), cada uma dessas etapas é importante para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados da pesquisa. A delimitação do universo ajuda a determinar o tamanho adequado da amostra, enquanto o estudo-piloto ajuda a identificar problemas potenciais com o questionário ou a metodologia da pesquisa. A coleta e a análise dos dados de campo permitem que os pesquisadores testem suas hipóteses e examinem a relação entre as variáveis. O método *Survey* é uma ferramenta para pesquisadores que desejam coletar dados preciosos e confiáveis em estudos quantitativos.

Foi realizada a implementação do estudo-piloto para validar o instrumento de pesquisa utilizado no levantamento de dados. Nesse sentido, aplicou-se um formulário contendo um conjunto de questões relacionadas às variáveis observadas, o qual foi submetido a 6 especialistas da cadeia do agronegócio das áreas mapeadas do setor de pós-colheita brasileiro, para validar a aplicação do questionário, na pesquisa-piloto; com perfil abrangendo formação e trabalho com experiência de no mínimo 10 anos na área de pós-colheita. O objetivo da aplicação do estudo-piloto é ajustar e validar o instrumento antes de sua aplicação em campo, sendo uma etapa importante para garantir a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos (Forza, 2002).

A população deste estudo são empresas do setor de pós-colheita do agronegócio atuantes no Brasil; com mais de 5 anos atuando no mercado de pós-colheita. A escolha por empresas do

pós-colheita se deve à pressão que enfrentam para atender às legislações internacionais, certificações e exportação de seus produtos (Schmitz, 2022). O instrumento de pesquisa utilizado para a coleta de dados foi um questionário estruturado, apresentado no Apêndice 2 (Bryman, 2003).

Para mensurar as respostas, foi adotada a escala Likert, de cinco pontos, a qual permite aos especialistas entrevistados ponderarem de forma clara e amplamente utilizada seu nível de concordância com cada afirmação proposta (Likert, 1932). O tamanho mínimo da amostra foi determinado por meio de cálculos realizados pelo *software* Minitab, seguindo os parâmetros propostos por Cohen (1988). Para isso, foram identificados os valores de entrada para o tamanho do efeito da amostragem e o poder do teste estatístico.

Na sequência, foram realizadas a preparação e a coleta de dados, sendo enviado um formulário (contendo no apêndice) contendo as questões relacionadas ao tema de estudo para 180 gestores e especialistas da cadeia do agronegócio, no período de outubro de 2022 a dezembro de 2022. Houve um retorno de 127 formulários respondidos, o que representou uma taxa de respostas de 71%.

Para calcular o tamanho da amostra mínima, foi usado o *software* Minitab, com os parâmetros necessários de tamanho do efeito (f^2), poder do teste e nível de significância. Nesse caso, tem-se: $f^2 = 0,15$, e poder do teste = 0,80, conforme procedimento recomendado por Cohen (1988) e Westland (2010). O resultado indicou o tamanho da amostra mínimo necessário para cada grupo de 51 amostras — o tamanho total necessário da amostra é de pelo menos 102 amostras, usando um teste ANOVA, com dois grupos; os grupos foram definidos de acordo com a variável independente em análise, garantindo que cada grupo fosse homogêneo internamente e diferisse entre si com base nos parâmetros de interesse.

Os resultados deste estudo fornecem informações sobre a percepção dos gestores e especialistas da cadeia do agronegócio em relação ao tema investigado, destacando a importância de se considerar as opiniões desses profissionais em futuras discussões e estratégias relacionadas ao setor do agronegócio. Além disso, o uso de métodos estatísticos rigorosos, como o cálculo do tamanho amostral mínimo, ajuda a garantir a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos.

3.4. PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS

Os procedimentos de análise de dados adotados neste estudo foram conduzidos de forma sistemática, para a extração de oportunidades significativas. Realizou-se uma avaliação da

qualidade dos dados e das relações entre as variáveis, seguida de um processo de tratamento de dados, para garantir a confiabilidade das análises subsequentes. A seguir, as ferramentas estatísticas e o movimento de análise desenvolvido:

- **Análise das notas da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e práticas da Economia Circular – Média por respondente:** Inicialmente, calculou-se a média das notas atribuídas pelos respondentes às tecnologias da Indústria 4.0 e às práticas da Economia Circular. Isso foi feito para consolidar as informações de uma série de variáveis em uma única métrica para cada respondente, considerando que as análises de questionários podem apresentar notas/resultados subjetivos, os quais influenciam o poder discriminatório; assim, a média consolida a informação de 10 variáveis da adoção de tecnologias da I4.0 e de 16 práticas da CE;
- **ANOVA para análise da influência do tamanho da empresa e influência dos dados dos respondentes:** Realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para examinar se o tamanho da empresa (classificada como pequena, média ou grande) exercia alguma influência na adoção das práticas de economia circular. Detectou-se um valor atípico (“outlier”) nos dados dos respondentes, que foi excluído das análises subsequentes devido à sua natureza discrepante — essa resposta foi desconsiderada nas análises.
- **Análise de Regressão Linear:** Utilizou-se uma análise de regressão para explorar o impacto das variáveis independentes, incluindo as tecnologias da Indústria 4.0, os dados dos respondentes, a experiência, o tamanho da empresa e a cadeia do agronegócio na adoção de práticas da economia circular. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar o quanto o modelo estatístico explicava a variação na variável dependente.

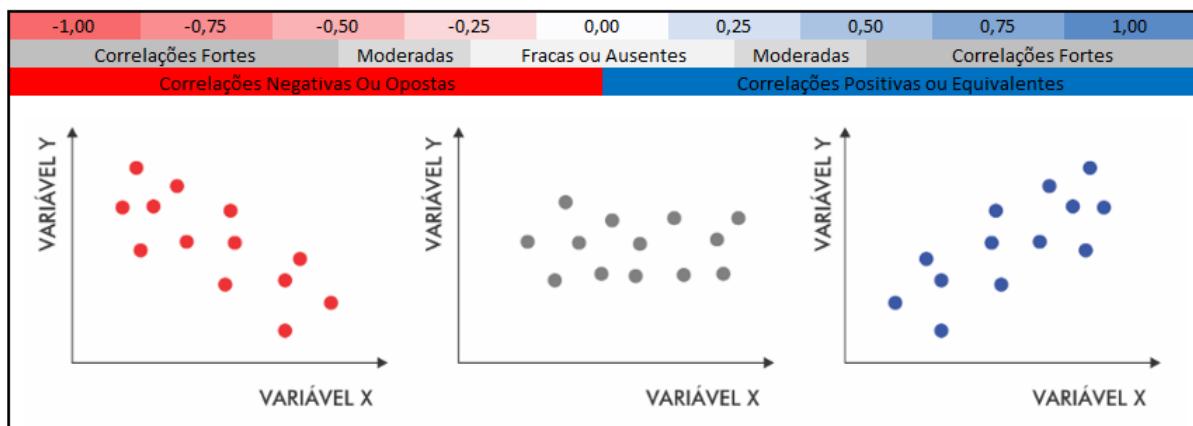
Nos resultados, o Valor-P para “tamanho da empresa” e “cadeia do agronegócio” não apresentou valores significativos a 5% (Valor-P maior que 0,05 descarta a hipótese nula). Mas R2 apresentou resultado de 35%, representando a proporção da variação total dos dados, que é explicada pelo modelo estatístico, indicando o quanto as variáveis independentes (fatores) incluídas no modelo conseguem explicar a variação na variável dependente, ou seja, no resultado. Considerando o contexto, o R2 de 35% é uma medida que indica o quanto bem o modelo se ajusta aos dados.

- **Análise de Pareto:** Foi aplicada uma análise de Pareto para avaliar o grau de influência de cada variável (X) nas práticas de economia circular (Y). Isso permitiu identificar quais variáveis tinham impacto na adoção dessas práticas.

- **Gráfico de intervalos de médias da Economia Circular por função de respondente:**
Utilizou-se essa representação gráfica para visualizar as médias das práticas de economia circular em relação às funções dos respondentes; e a resposta apresenta 30% da dispersão da adoção de práticas da economia circular, que é produzida por “x1”; e 35%, por “x2” (x1: dados dos respondentes; e x2: tamanho da empresa).
- **Correlação de Spearman:** Esse teste estatístico foi escolhido para avaliar a relação entre variáveis quando a distribuição dos dados não era normal. O teste de correlação de *Spearman* permitiu determinar se existia uma correlação positiva, negativa ou nenhuma correlação entre as variáveis estudadas. Os valores de correlação foram interpretados de acordo com os critérios-padrão: correlações fracas, moderadas e fortes, com resultados variando de -1 a +1. A escolha do teste de correlação de *Spearman* foi vantajosa, pois ele é menos sensível a desvios de normalidade dos dados, fornecendo resultados robustos, mesmo nessas situações. Assim, pôde-se explorar o relacionamento entre as variáveis estudadas, mesmo quando a normalidade dos dados não era atendida (Spearman, 1992).

A seguir, a Figura 11 apresenta a interpretação da correlação de *Spearman*

Figura 11 - Interpretação da correlação de *Spearman*



Fonte: Adaptado de Spearman, 1992.

Essa representação gráfica ilustra a aplicação da Correlação de *Spearman* no âmbito da pesquisa, destacando a metodologia empregada para correlacionar os dados e identificar padrões e relações, variando de correlações mais tênuas a mais robustas. Esse método visa compreender as inter-relações entre variáveis, fornecendo ideias para melhorar a eficiência nesse aspecto específico.

Assim, este trabalho utilizou os seguintes parâmetros para identificar as intensidades das correlações (Cohen, 1988):

- ✓ Correlações fracas: valores de -0,29 até -0,10 e de 0,10 até 0,29;
- ✓ Correlações moderadas: valores de -0,49 até -0,30 e de 0,30 até 0,49;
- ✓ Correlações fortes: abaixo de -0,50 e acima de 0,50.

Esses procedimentos analíticos foram adotados para fornecer uma compreensão abrangente das relações entre as tecnologias da Indústria 4.0, as práticas da economia circular e os fatores contextuais, contribuindo, assim, para os resultados e conclusões deste estudo.

4. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados da pesquisa. Primeiramente, são detalhadas as etapas para sua avaliação, com o intuito de verificar se existe relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e a adoção de práticas circulares. Em segundo lugar, são apresentados os resultados do teste de correlação de *Spearman*, com o propósito de averiguar a influência dos agentes econômicos na intensidade — moderada a forte — das práticas da economia circular.

4.1. AVALIAÇÃO DA PESQUISA

Neste estudo, foi realizada uma análise da adoção de tecnologias da Indústria 4.0, conforme identificado na literatura, com base nas contribuições de Schwab (2017). Dentre as tecnologias consideradas estão: Big Data e Analytics, Robôs Autônomos, Simulação Digital e Gêmeos Digitais, Internet das Coisas, Computação em Nuvem/*Blockchain*, Impressão 3D e Manufatura Aditiva, Realidade Virtual e Aumentada, Cyber Segurança Industrial, Integração de Sistemas e Interoperabilidade, Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina.

Além disso, foram analisadas a adoção e a evolução dos conceitos de circularidade. Por meio de uma revisão atualizada da literatura, foram identificadas 21 práticas, divididas em 16 categorias relacionadas à circularidade. As práticas adotadas pelos autores dentro da revisão da literatura são: Regenerar, Recusar, Compartilhar, Recondicionar/Remanufaturar/Renovar, Otimizar, Reduzir, Reaproveitar/Reutilizar, Ciclar, Reciclar, Reparar/Manter, Repensar, Recuperar/Renovar, Prolongar, Virtualizar, Trocar e Reposicionar.

4.2. ANÁLISE PRELIMINAR ESTATÍSTICA

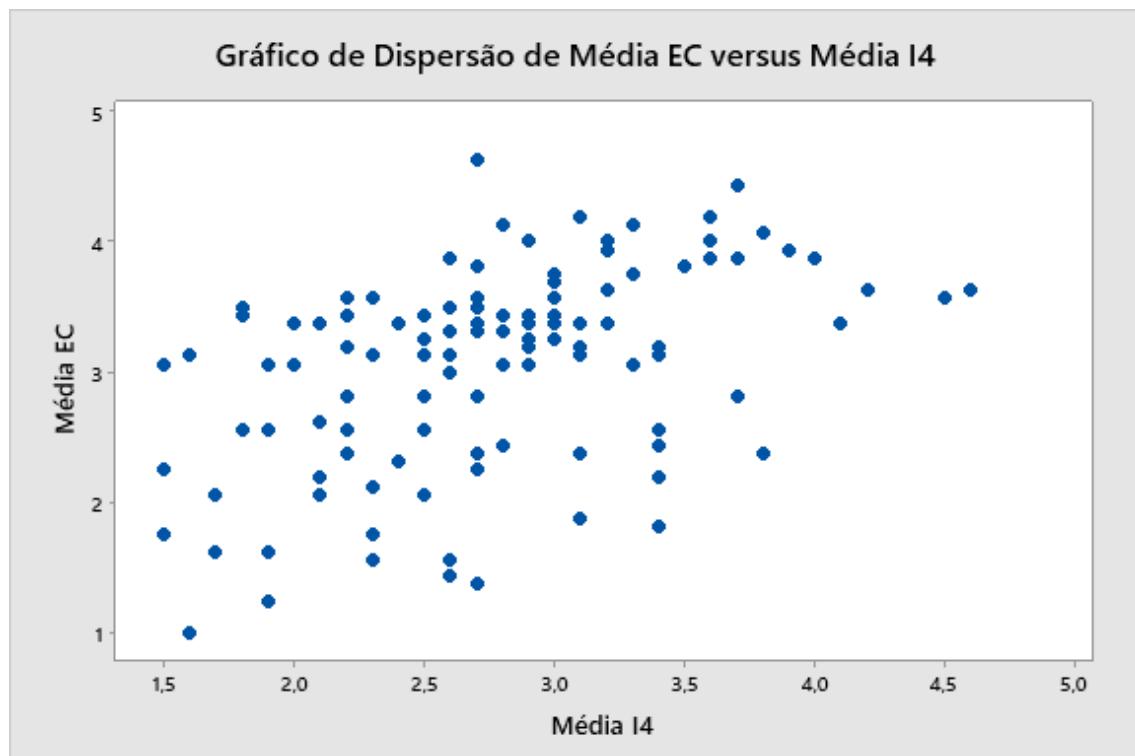
Nesta seção, abordaremos a Análise Preliminar Estatística da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e práticas da Economia Circular.

4.2.1. Análise das notas de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e de práticas da Economia Circular — Média por respondente

Inicialmente, é fundamental direcionar a atenção para a análise das médias, que representam as estatísticas básicas das variáveis em análise. Isso se deve ao fato de que as respostas em questionários podem, muitas vezes, ser subjetivas, o que pode influenciar o poder

discriminatório dos resultados. Nesse contexto, a média desempenha e consolida as informações provenientes de 10 variáveis relacionadas à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 e de 16 variáveis ligadas às práticas da economia circular. Esse panorama é claramente demonstrado no gráfico apresentado abaixo.

Gráfico 2 - Gráfico de dispersão de média relacionando as práticas da economia solidária e as tecnologias da Indústria 4.0



Fonte: Autora.

O gráfico de dispersão das médias dos resultados da pesquisa revela uma correlação sutil entre as práticas da economia circular e a média das tecnologias da Indústria 4.0. Essa dispersão sugere que não se pode, prontamente, descartar uma possível relação entre essas variáveis, enfatizando a necessidade de uma análise aprofundada mediante o uso de outras ferramentas estatísticas, com vistas a entender completamente sua natureza. A observação indica que, embora não haja uma correlação aparente à primeira vista, investigações adicionais podem revelar oportunidades sobre como as tecnologias da Indústria 4.0 impactam as práticas da economia circular nas empresas do agronegócio.

4.2.2. ANOVA para análise da influência do tamanho da empresa e influência dos dados do respondente

Conduziu-se uma análise de variância (ANOVA) com o propósito de investigar se o porte da empresa (categorizado como pequeno, médio ou grande) exerce influência estatística na adoção das práticas de economia circular.

Figura 12 - Análise de Variância – ANOVA (dados – respondente, tamanho e cadeia)

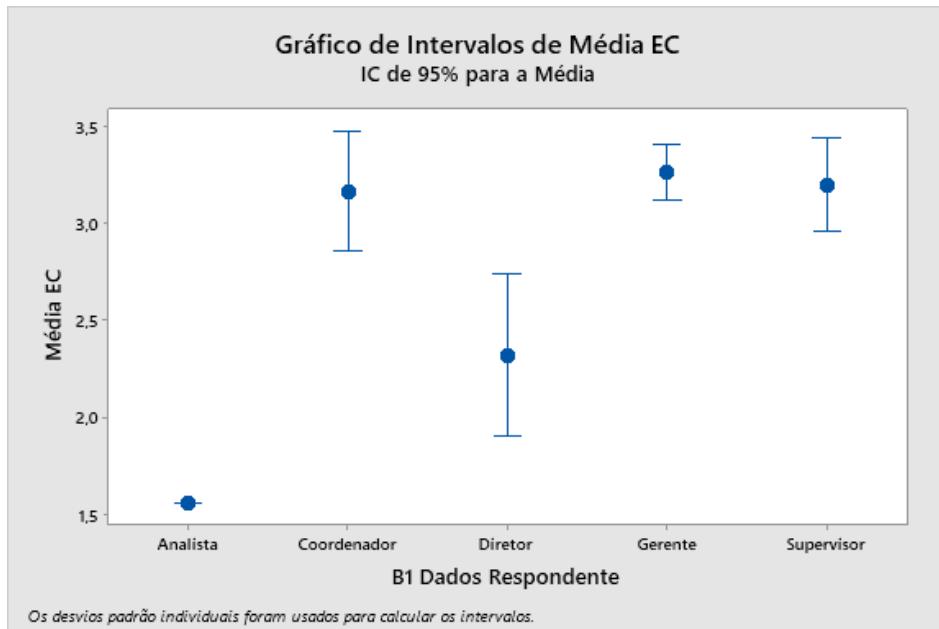
Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Régressão	10	26,286	2,6286	7,85	0,000
Média I4	1	6,345	6,3450	18,95	0,000
B1 Dados Respondente	3	7,945	2,6482	7,91	0,000
1.3 Tamanho	2	1,363	0,6813	2,03	0,135
1.4 Cadeia	4	2,315	0,5788	1,73	0,148
Erro	115	38,506	0,3348		
Falta de ajuste	106	34,893	0,3292	0,82	0,709
Erro puro	9	3,613	0,4015	*	*
Total	125	64,792			

Sumário do Modelo					
S	R2	R2(aj)	R2(pred)		
0,578653	40,57%	35,40%	*		

Fonte: Autora.

O intervalo das médias da economia circular por função do respondente, apresentado pela análise de variância, aponta que não há diferença entre as médias dos grupos para as tecnologias da Indústria 4.0; o valor-p é menor que o nível de significância de 0,05, havendo evidências suficientes para concluir que pelo menos um par de grupos é estatisticamente diferente e que há diferença entre as médias, considerando tamanho e cadeia

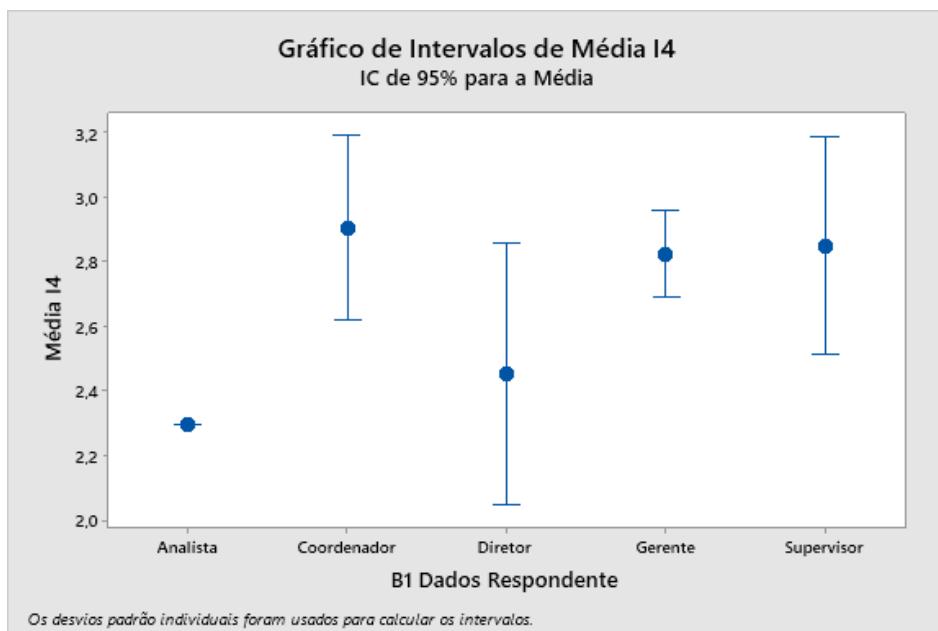
Gráfico 3 - Gráfico de intervalo de médias da adoção de práticas da economia circular, por função do respondente



Fonte: Autora.

Analizando o gráfico de intervalos das médias das práticas da economia circular, identificou-se um valor discrepante (“outlier”) nos dados relacionados ao respondente. Nesse contexto, o respondente em questão era o único analista participante da pesquisa, e sua resposta foi excluída das análises subsequentes devido à natureza discrepante desse valor atípico, garantindo, assim, a integridade e a consistência dos resultados.

Gráfico 4 - Gráfico de intervalo de médias da adoção de tecnologias da Indústria 4.0, por função dos respondentes



Fonte: Autora.

Ao examinar o gráfico de intervalos das médias das tecnologias da Indústria 4.0, observou-se a presença de um valor discrepante (“outlier”) nos dados do respondente, da mesma forma como ocorreu na análise das práticas de economia circular. Consequentemente, esse valor atípico foi igualmente removido das análises subsequentes, assegurando a integridade e a consistência dos resultados obtidos.

Prosseguindo, realizou-se a contagem das variáveis discretas dos dados do respondente B1, a fim de verificar a tabulação dos resultados e simplificar as análises subsequentes.

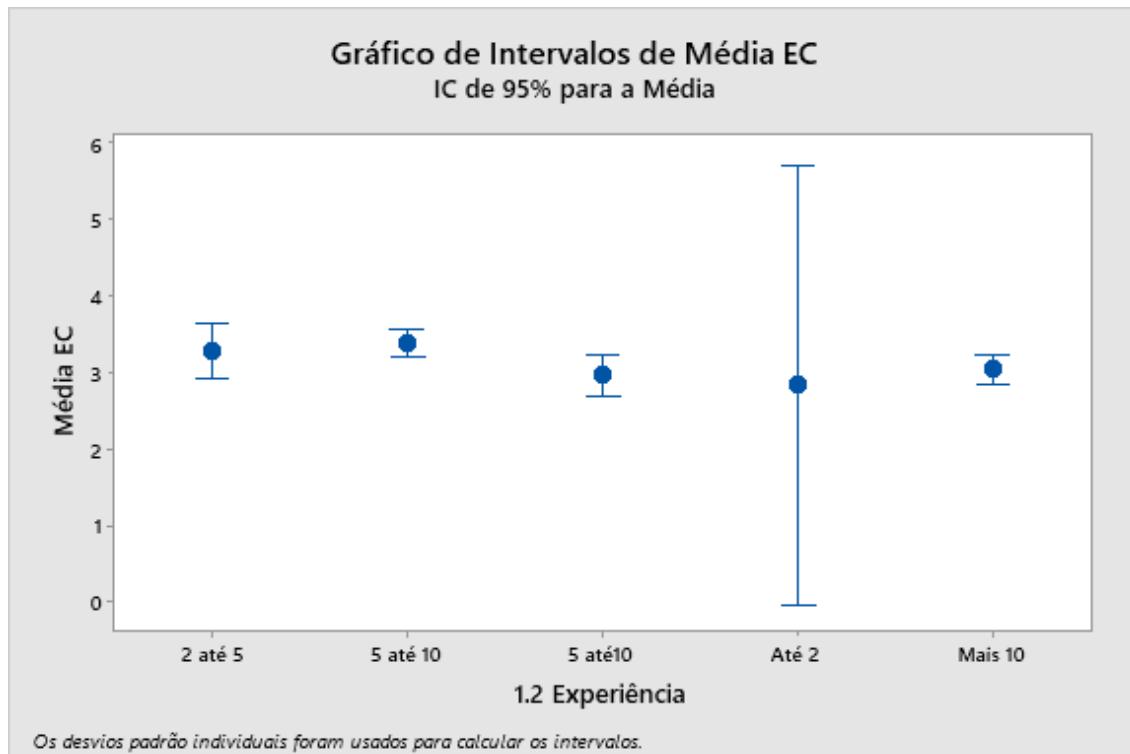
Contagem:

B1 Dados

Respondente	Contagem
Analista	1
Coordenador	19
Diretor	18
Gerente	79
Supervisor	10
N=	127

A seguir, apresenta-se o gráfico de intervalos de médias da economia circular.

Gráfico 5 - Gráfico de intervalos de médias da adoção de práticas da economia circular, pelo tempo de experiência dos respondentes

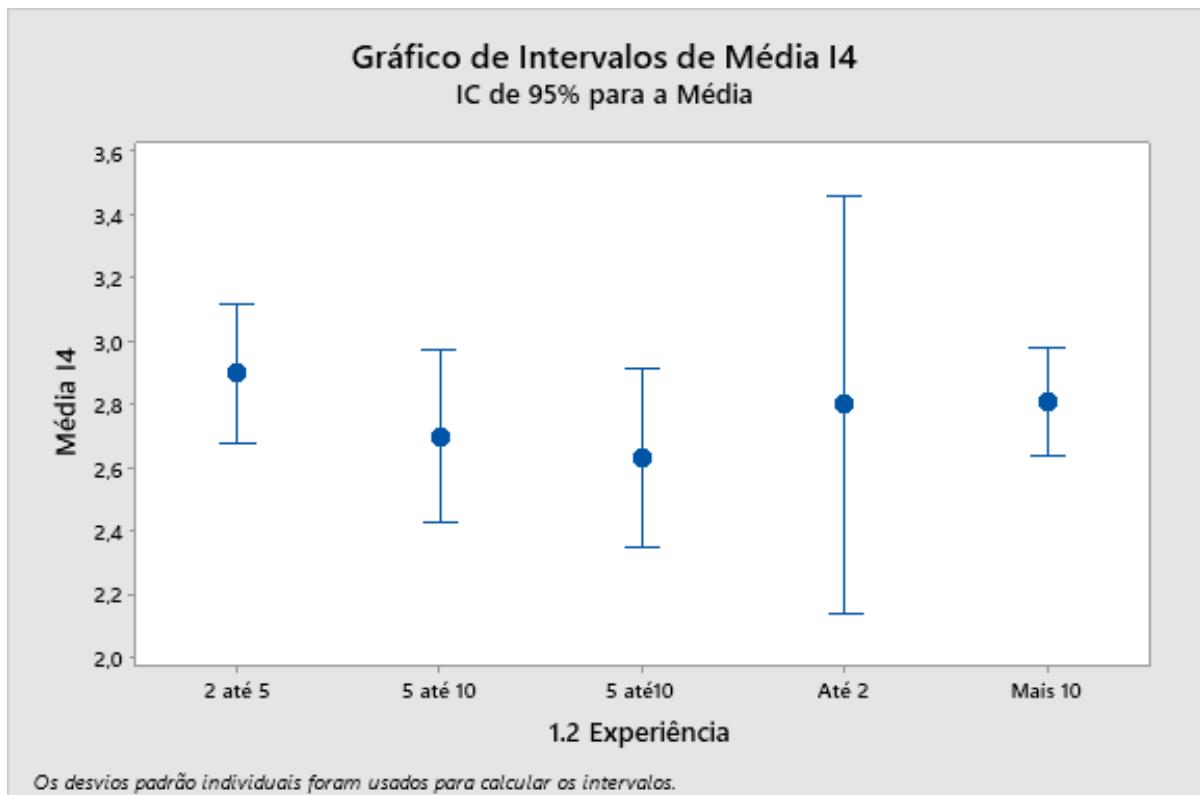


Fonte: Autora.

O gráfico de intervalos das médias das práticas de economia circular exibe valores centralizados para a maioria das respostas, havendo apenas uma dispersão maior nas respostas dos respondentes com até 2 anos de experiência.

O gráfico de intervalos das médias das tecnologias da Indústria 4.0 a seguir revela uma variação entre as respostas, apresentando uma amplitude maior das respostas entre os respondentes com menos de 2 anos de experiência.

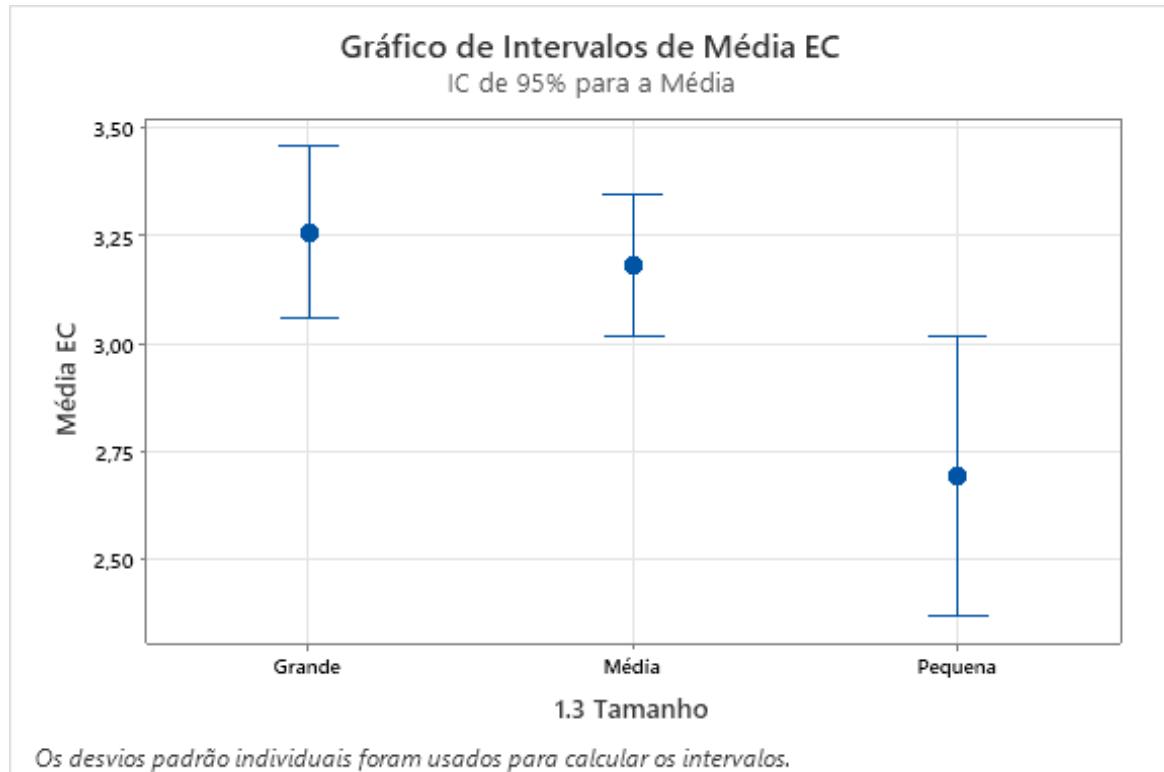
Gráfico 6 - Gráfico de intervalos de médias da adoção de tecnologias da Indústria 4.0, pelo tempo de experiência do respondente



Fonte: Autora.

O gráfico a seguir, de intervalos de médias, que representa a adoção de práticas da economia circular, classificadas por tamanho da empresa do respondente, exibe a média inferior para a adoção dessas práticas em empresas de menor porte em relação a empresas de portes médio e grande — as médias podem ser consideradas iguais.

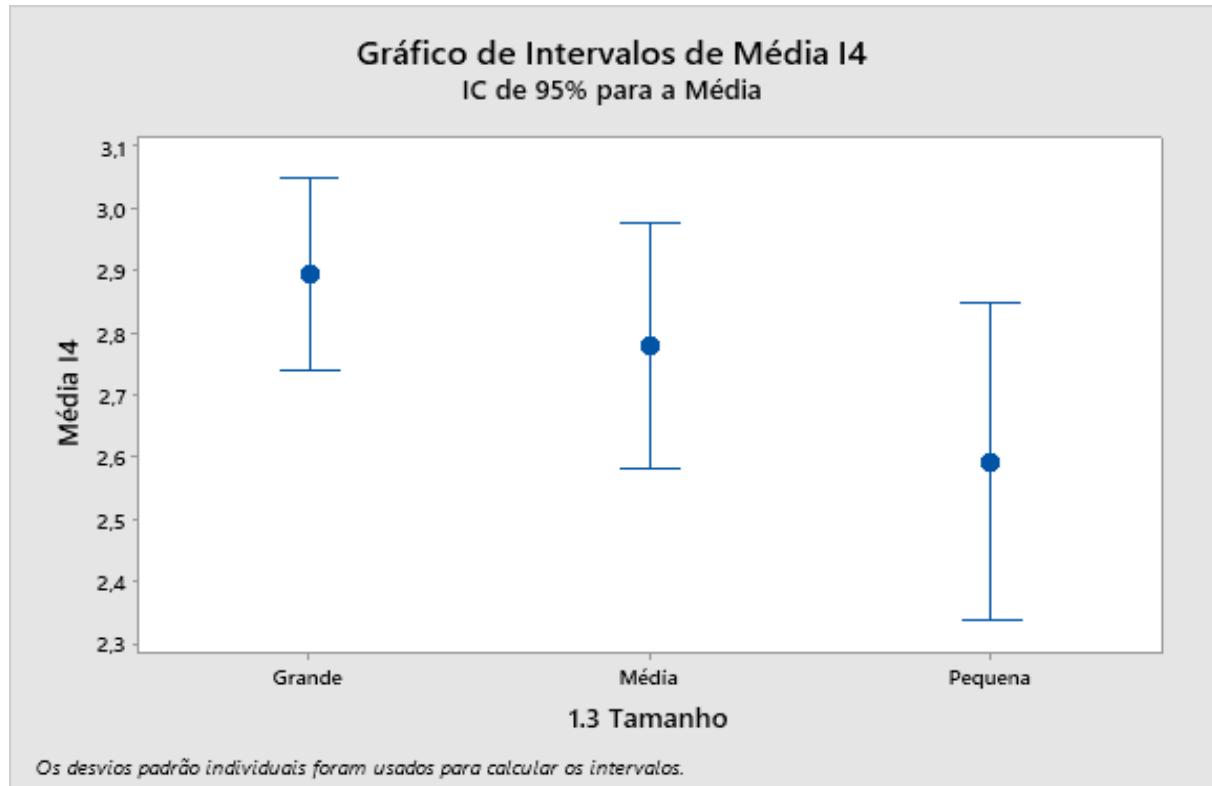
Gráfico 7 - Gráfico de intervalos de médias da adoção de práticas da economia circular, pelo tamanho da empresa do respondente



Fonte: Autora.

O gráfico de intervalos de médias, que representa a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, categorizado pelo tamanho da empresa do respondente, revela uma amplitude maior para as empresas de pequeno porte. No entanto, é importante notar que, devido à natureza do gráfico de intervalos, as médias para empresas de pequeno porte são diferentes das médias de empresas de médio e grande portes.

Gráfico 8 - Gráfico de intervalos de médias da adoção de tecnologias da Indústria 4.0, pelo tamanho da empresa do respondente



Fonte: Autora.

Realizada a contagem de variáveis discretas para checagem – 1.3 Tamanho.

Contagem:

1.3 Tamanho Contagem	
Grande	52
Média	45
Pequena	30
N=	127

Realizada a contagem de variáveis discretas para checagem – 1.4 Cadeia.

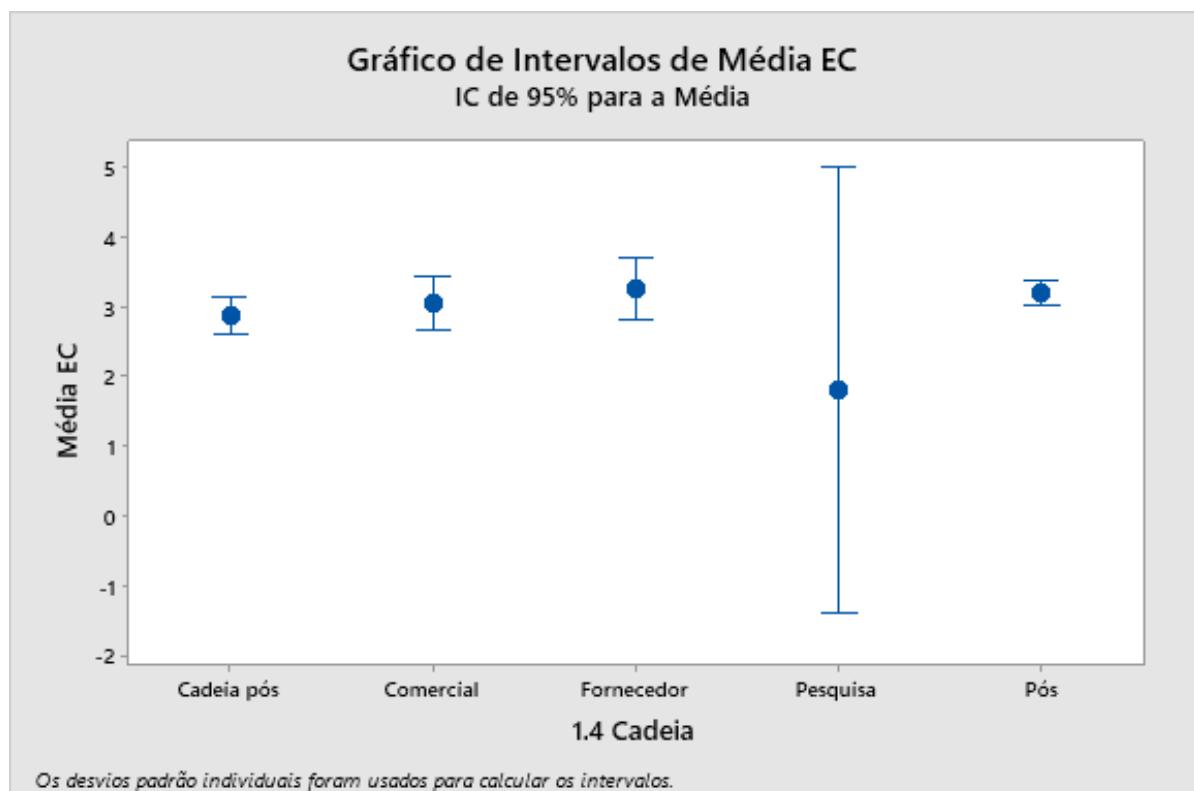
Contagem:

1.4 Cadeia Contagem	
Cadeia pós	27
Comercial	16
Fornecedor	10
Pesquisa	2
Pós	72
N=	127

O gráfico de intervalos de médias que avalia a adoção de práticas da economia circular, categorizado pelo tipo de empresa respondente, revela médias semelhantes para cadeias de

empresas do pós-colheita, setor comercial, fornecedores e para as próprias empresas de pós-colheita. No entanto, destaca-se que as médias das respostas dos representantes da área de pesquisa divergem, apresentando uma amplitude maior nas respostas. Isso pode ser atribuído à limitada representação dessa categoria, com apenas duas respostas, o que demonstra a variabilidade nas percepções dos indivíduos que representam a área de pesquisa.

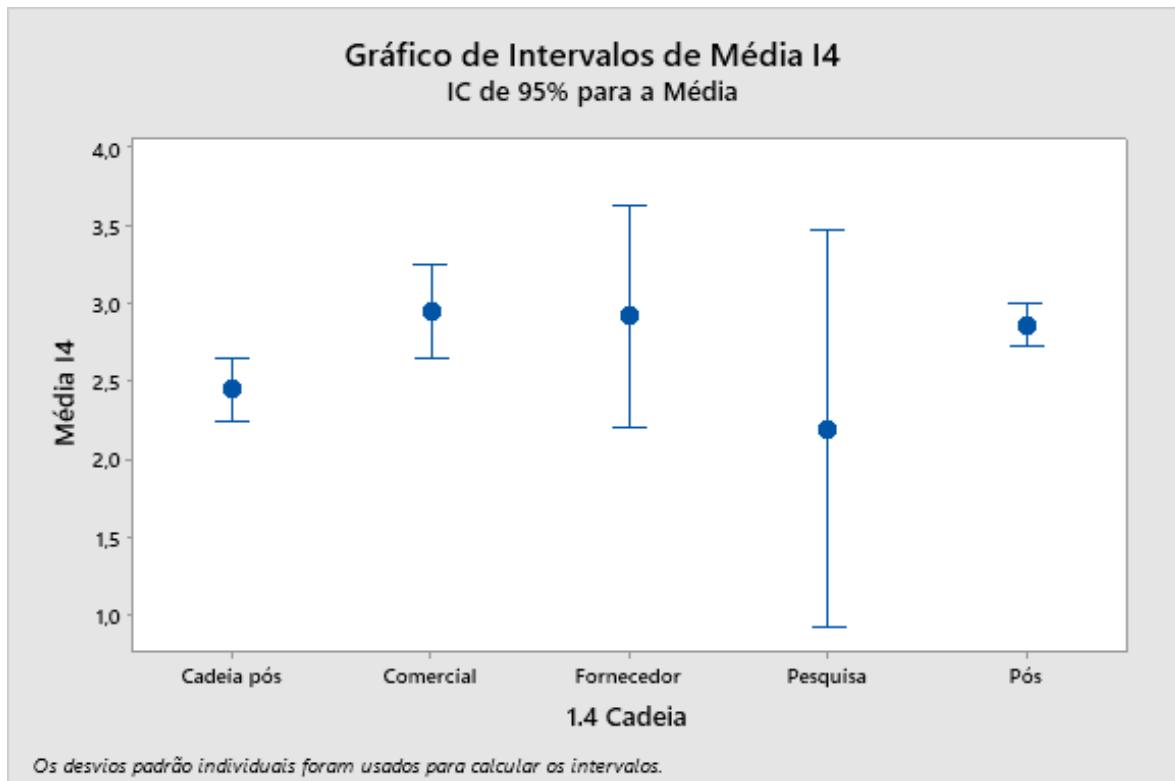
Gráfico 9 - Gráfico de intervalos de médias da adoção de práticas da economia circular, por tipo de empresa respondente



Fonte: Autora.

O gráfico de intervalos de médias, ao contemplar a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 com base no tipo de empresa respondente, revelou médias bastante semelhantes. No entanto, uma exceção ocorreu nas respostas atribuídas ao tipo de empresa relacionada à área de pesquisa, demonstrando, novamente, a questão abordada anteriormente nesta análise, em que a representatividade limitada desse grupo resultou em maior variabilidade nas médias.

Gráfico 10 - Gráfico de intervalos de médias da adoção de tecnologias da indústria 4.0, por tipo de empresa respondente

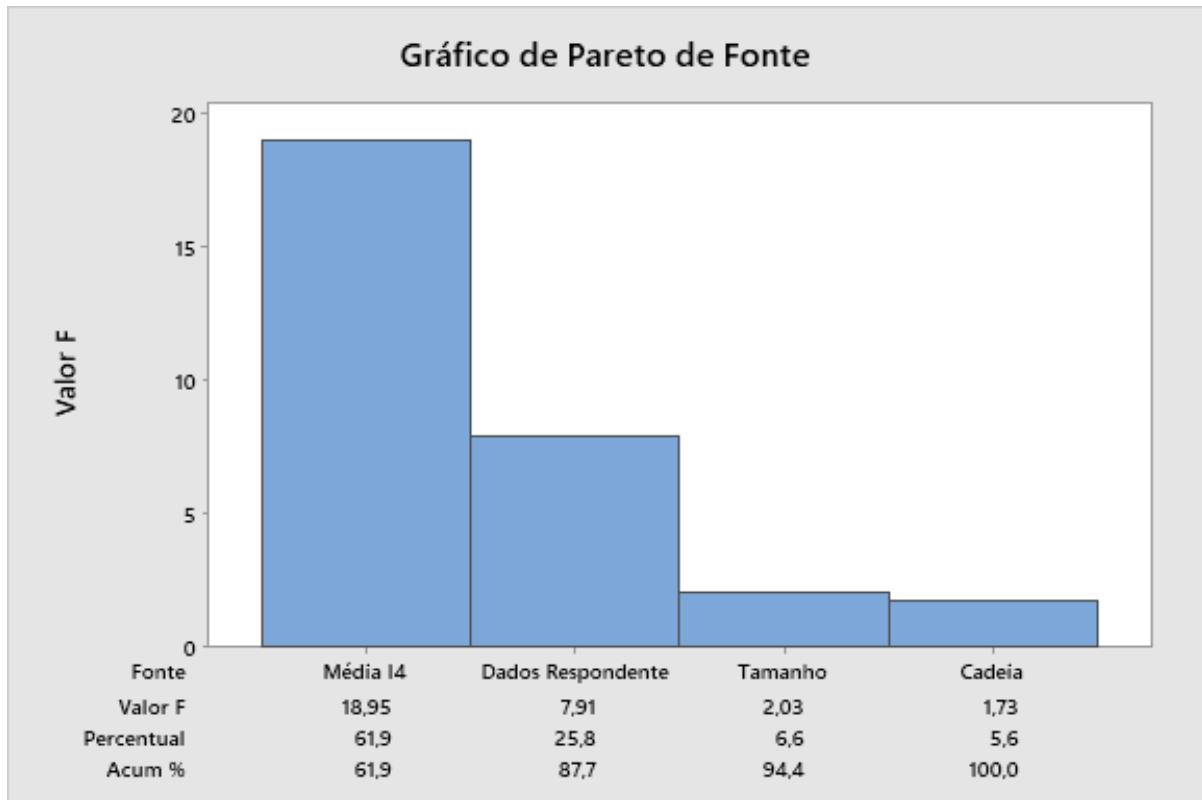


Fonte: Autora.

4.2.3. Análise de Pareto

Empregou-se uma análise de Pareto com o intuito de avaliar a magnitude da influência de cada variável (X) nas práticas da economia circular (Y). Esse método possibilitou a identificação das variáveis que têm impacto na adoção dessas práticas.

Gráfico 11 - Gráfico de Pareto de fonte dos dados



Fonte: Autora.

O gráfico de Pareto oferece uma visualização do nível de influência de cada variável “x” sobre a variável “y”. Nesse contexto, a análise revela que cerca de 38% da dispersão na adoção de práticas de economia circular é atribuída à variável “x1”, que representa a média das tecnologias da Indústria 4.0. Além disso, aproximadamente 13% da variação é explicada pela variável “x2”, relacionada aos dados dos respondentes.

4.2.4. Análise de Regressão

Foi conduzida uma análise de regressão com o propósito de investigar o impacto das variáveis independentes, que englobam as tecnologias da Indústria 4.0, nas análises baseadas nos dados dos respondentes, na experiência, no tamanho da empresa, na cadeia do agronegócio e na adoção de práticas da economia circular. O coeficiente de determinação (R^2) foi empregado para avaliar a capacidade do modelo estatístico em explicar a variação na variável dependente.

A análise de regressão pela média da adoção de práticas da economia circular *versus* a média da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 demonstra que as variáveis “tamanho da empresa” e “cadeia do agronegócio” não apresentaram valores significativos a 5% (Valor-P maior que 0,05, o que descarta a hipótese nula). No entanto, R^2 alcançou um resultado de 45%,

indicando que 45% da variação total dos dados pode ser explicada pelo modelo estatístico. Esse valor reflete o grau de ajuste do modelo aos dados, levando em consideração o contexto da pesquisa.

Tabela 6 - Análise de Variância Método: Codificação de preditores categóricos

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Régressão	15	30,440	2,0293	6,13	0,000
Média I4	1	6,407	6,4066	19,36	0,000
B1 Dados Respondente	4	7,915	1,9788	5,98	0,000
1.2 Experiência	4	1,778	0,4445	1,34	0,258
1.3 Tamanho	2	1,409	0,7044	2,13	0,124
1.4 Cadeia	4	2,597	0,6491	1,96	0,105
Erro	111	36,729	0,3309		
Falta de ajuste	102	33,115	0,3247	0,81	0,719
Erro puro	9	3,613	0,4015	*	*
Total	126	67,169			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,575229	45,32%	37,93%	*

Tabela 7 - Coeficientes

Termo	Coef	Coef	EP de	Valor-	Valor-
			T	P	VIF
Constante	1,701	0,876	1,94	0,055	
Média I4	0,3916	0,0890	4,40	0,000	1,19
B1 Dados					
Respondente					
Coordenador	0,573	0,837	0,68	0,495	34,19
Diretor	-0,106	0,841	-0,13	0,900	33,01
Gerente	0,727	0,823	0,88	0,380	61,19
Supervisor	0,684	0,845	0,81	0,420	19,90

1.2 Experiência

5 até 10	0,209	0,221	0,94	0,348	1,84
5 até 10	-0,161	0,185	-0,87	0,387	1,81
Até 2	-0,469	0,362	-1,30	0,198	1,16
Mais 10	-0,132	0,154	-0,86	0,393	2,25

1.3 Tamanho

Média	-0,148	0,128	-1,16	0,248	1,43
Pequena	-0,291	0,145	-2,00	0,048	1,46

1.4 Cadeia

Comercial	-0,254	0,193	-1,32	0,190	1,57
Fornecedor	0,336	0,239	1,41	0,163	1,59
Pesquisa	-0,907	0,600	-1,51	0,134	2,14
Pós	-0,074	0,144	-0,51	0,609	1,94

Tabela 8 - Equação de Regressão

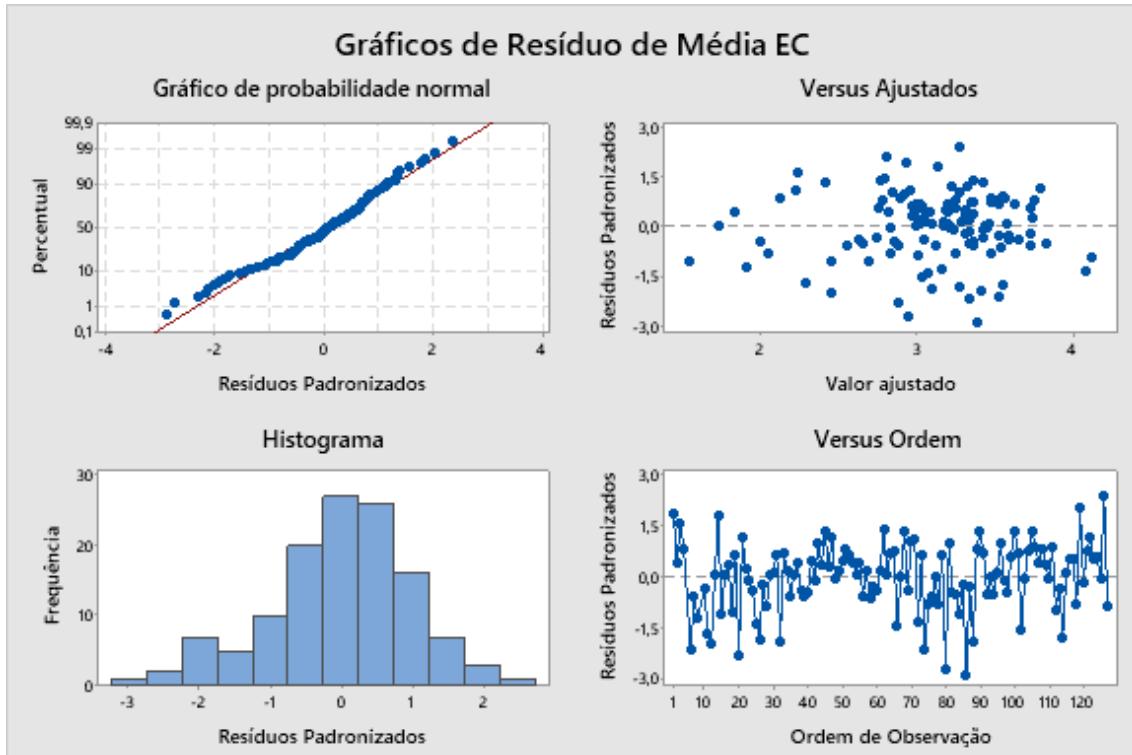
$$\begin{aligned}
 \text{Média} &= 1,701 + 0,3916 \text{ Média I4} + 0,0 \text{ B1 Dados Respondente_Analista} \\
 \text{EC} &+ 0,573 \text{ B1 Dados Respondente_Coordenador} \\
 &- 0,106 \text{ B1 Dados Respondente_Diretor} \\
 &+ 0,727 \text{ B1 Dados Respondente_Gerente} \\
 &+ 0,684 \text{ B1 Dados Respondente_Supervisor} \\
 &+ 0,0 \text{ 1.2 Experiência_2 até 5} + 0,209 \text{ 1.2 Experiência_5 até 10} \\
 &- 0,161 \text{ 1.2 Experiência_5 até 10} - 0,469 \text{ 1.2 Experiência_Até 2} \\
 &- 0,132 \text{ 1.2 Experiência_Mais 10} + 0,0 \text{ 1.3 Tamanho_Grande} \\
 &- 0,148 \text{ 1.3 Tamanho_Média} \\
 &- 0,291 \text{ 1.3 Tamanho_Pequena} + 0,0 \text{ 1.4 Cadeia_Cadeia_pós} \\
 &- 0,254 \text{ 1.4 Cadeia_Comercial} + 0,336 \text{ 1.4 Cadeia_Fornecedor} \\
 &- 0,907 \text{ 1.4 Cadeia_Pesquisa} - 0,074 \text{ 1.4 Cadeia_Pós}
 \end{aligned}$$

Tabela 9 - Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Média		Resíduo		
	EC	Ajuste	Resíduo	Padrão	
5	2,063	2,063	-0,000	*	X
6	2,188	3,344	-1,156	-2,16 R	
9	1,563	1,562	0,000	*	X
12	1,563	2,459	-0,896	-1,99	X
20	1,625	2,888	-1,263	-2,28 R	
74	2,375	3,529	-1,154	-2,12 R	
80	1,438	2,949	-1,512	-2,73 R	
86	1,813	3,395	-1,582	-2,89 R	
119	3,875	2,809	1,066	2,05 R	
126	4,625	3,279	1,346	2,39 R	

*R Resíduo grande**X Atípicos X*

Gráfico 12 - Gráficos de resíduo de média – economia solidária



Fonte: Autora.

Os gráficos de resíduos, em uma análise de regressão, são uma parte importante para avaliar a adequação do modelo estatístico. O gráfico de resíduos contra valores ajustados demonstra que há um certo padrão nos resíduos, devido ao valor ajustado aumentado. Como os resíduos se distribuem, relativamente, de forma aleatória em torno de zero, sugere-se que o modelo é apropriado. O gráfico de resíduos, comparado a uma distribuição normal teórica, indica a normalidade dos resíduos.

O gráfico de resíduos contra variáveis independentes (ou preditoras) mostra que os resíduos têm algum padrão relacionado a cada variável independente. O gráfico de resíduos parciais mostra a relação entre um único preditor e os resíduos, mantendo os outros preditores constantes. Eles ajudam a identificar se a relação entre uma variável independente e a variável dependente é linear. Ao analisar os gráficos, não foram observados padrões que precisassem ser tratados, como: não linearidade, heterocedasticidade (variância não constante dos resíduos) e *outliers*.

4.3. CORRELAÇÃO DE SPEARMAN

Para examinar a relação entre variáveis em condições em que a distribuição dos dados não seguia uma normalidade, optou-se pelo teste de correlação de *Spearman* nesta análise estatística. Esse teste proporcionou a avaliação de correlações positivas, negativas ou sua ausência entre as variáveis em estudo. Os valores de correlação foram interpretados conforme os critérios estabelecidos, indicando correlações fracas, moderadas ou fortes, com uma escala de -1 a +1. Essa abordagem permitiu explorar os relacionamentos entre as variáveis, proporcionando descobertas, independentemente da conformidade com a normalidade dos dados.

Retomando os parâmetros utilizados para identificar as intensidades das correlações (Cohen, 1988), tem-se:

- Correlações fracas: valores de -0,29 até -0,10 e de 0,10 até 0,29
- Correlações moderadas: valores de -0,49 até -0,30 e de 0,30 até 0,49
- Correlações fortes: abaixo de -0,50 e acima de 0,50

Foram conduzidas as 16 análises da correlação de *Spearman*, associando as 16 práticas da economia circular às tecnologias da Indústria 4.0. Elaborou-se uma tabela-resumo, que destaca os valores das correlações e os valor-p correspondentes. Cada correlação oferece interpretações sobre a interação entre as práticas circulares e as tecnologias da Indústria 4.0. A tabela consolidada proporcionará uma visão abrangente dessas relações, fornecendo uma base sólida para a interpretação e a discussão aprofundadas dos resultados. Esse passo compreende a influência das tecnologias na adoção de práticas sustentáveis no contexto do agronegócio, contribuindo para o avanço do conhecimento nessa área.

Primeiramente, apresenta-se a tabela com o resumo dos valores das correlações de *Spearman*, desenvolvida com a formatação condicional, utilizando-se a escala de cores para identificar a variação de correlações, em que a cor verde, mais intensa, apresenta as correlações mais fortes positivas; vermelho, mais intenção em relação às correlações fortes negativas; e a cor branca, quanto mais se aproxima, mais o valor da correlação é próximo a zero ou nulo.

Na sequência, apresenta-se a tabela com as correlações e o valor-p:

Tabela 10 - Resumo dos valores das Correlações de Spearman, com valor-p

		Big Data	Robôs Autônomos e Drones	Simulação	Internet das Coisas	Computação Nuvem, Blockchain	Manufatura Aditiva / RFID	Realidade Aumentada	Sistemas Cibernéticos Físicos	Ciber Segurança	Inteligência Artificial					
EC_1	Regenerar	Correlação	0,306	0,366	0,399	0,572	0,060	0,224	0,164	0,137	0,126	0,167				
		P-Value	0,000	0,000	0,001	0,001	0,501	0,011	0,066	0,123	0,158	0,060				
EC_2	Recusar	Correlação	0,228	0,214	0,171	0,417	0,146	0,394	-	0,015	0,386	0,539	0,161			
		P-Value	0,010	0,016	0,054	0,001	0,102	0,002	0,868	0,001	0,000	0,071				
EC_3	Compartilhar	Correlação	0,291	0,312	0,118	0,195	0,524	0,155	0,164	0,378	0,387	0,214				
		P-Value	0,001	0,001	0,188	0,028	0,001	0,082	0,065	0,002	0,000	0,016				
EC_4	Recondicionar /	Correlação	0,127	0,296	0,099	-	0,025	0,303	-	0,099	-	0,070	0,243	0,137	0,142	
		P-Value	0,156	0,001	0,270	0,776	0,003	0,264	0,434	0,006	0,123	0,112				
EC_5	Otimizar	Correlação	0,524	-	0,499	0,481	0,065	-	0,039	0,144	0,193	0,264	0,174	0,378		
		P-Value	0,000	0,000	0,001	0,467	0,665	0,105	0,030	0,003	0,051	0,002				
EC_6	Reducir	Correlação	0,372	0,502	0,161	0,095	0,018	0,139	0,103	0,284	0,144	0,369				
		P-Value	0,000	0,000	0,071	0,286	0,845	0,119	0,348	0,001	0,117	0,002				
EC_7	Reaproveitar / Reutilizar	Correlação	0,203	0,213	0,086	0,151	0,053	0,158	0,002	0,328	0,338	0,124				
		P-Value	0,022	0,016	0,334	0,090	0,557	0,076	0,636	0,000	0,003	0,165				
EC_8	Ciclar	Correlação	0,153	0,330	-	0,056	0,325	-	0,044	0,090	-	0,028	0,194	0,141		
		P-Value	0,086	0,000	0,531	0,003	0,626	0,316	0,753	0,029	0,155	0,144				
EC_9	Reciclar	Correlação	0,263	0,266	0,186	0,105	0,162	0,506	-	0,115	0,257	0,265	0,371			
		P-Value	0,003	0,003	0,036	0,240	0,070	0,000	0,198	0,003	0,003	0,002				
EC_10	Reparar / Manter	Correlação	0,218	0,205	-	0,002	0,105	0,418	0,061	-	0,016	0,399	0,157	0,230		
		P-Value	0,014	0,021	0,984	0,242	0,001	0,498	0,859	0,002	0,078	0,009				
EC_11	Repensar	Correlação	0,291	0,384	0,039	-	0,005	-	0,105	-	0,016	-	0,119	0,528	0,198	0,266
		P-Value	0,001	0,000	0,667	0,956	0,241	0,858	0,181	0,002	0,026	0,003	0,003			
EC_12	Recuperar / Renovar	Correlação	0,259	0,261	0,071	0,335	0,008	0,317	0,241	0,875	0,008	0,042	0,007			
		P-Value	0,003	0,003	0,430	0,008	0,317	0,241	0,875	0,008	0,042	0,007				
EC_13	Prolongar	Correlação	0,153	0,254	0,026	0,196	-	0,105	0,109	0,177	-	0,046	0,130	0,592		
		P-Value	0,086	0,004	0,775	0,027	0,242	0,224	0,046	0,607	0,145	0,001				
EC_14	Virtualizar	Correlação	0,238	0,185	0,128	0,345	0,134	0,502	0,535	0,094	0,150	0,216				
		P-Value	0,007	0,370	0,150	0,005	0,132	0,000	0,000	0,293	0,866	0,015				
EC_15	Trocar	Correlação	0,402	0,541	0,229	0,193	-	0,028	0,137	0,038	0,267	0,150	0,242			
		P-Value	0,000	0,000	0,100	0,030	0,757	0,125	0,673	0,002	0,093	0,006				
EC_16	Reposicionar	Correlação	0,423	0,528	0,203	0,143	-	0,027	0,136	0,046	0,264	0,173	0,517			
		P-Value	0,000	0,000	0,022	0,108	0,766	0,128	0,607	0,003	0,051	0,000				

Fonte: Autora.

Legenda:

	Correlações fracas: valores de -0,29 até -0,10 e de 0,10 até 0,29
	Correlações moderadas: valores de -0,49 até -0,30 e de 0,30 até 0,49
	Correlações fortes: abaixo de -0,50 e acima de 0,50

Para seguir com as análises, foram identificados os valores significativos de correlação baseados no *p-value* (valor-p) — sendo uma medida estatística que avalia a significância da correlação observada entre duas variáveis, indicando a probabilidade de se obter uma correlação forte (ou mais forte) entre elas, assumindo que não há correlação real na população.

Interpretar o *p-value* envolve compará-lo com um nível de significância predeterminado, comumente definido em 0,05. Assim, se o *p-value* for menor que 0,05, geralmente consideramos a correlação como estatisticamente significativa, sugerindo que há evidências para rejeitar a hipótese nula de ausência de correlação. Por outro lado, se o *p-value* for maior que 0,05, não temos evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, indicando falta de significância estatística na correlação observada.

Em resumo, um *p-value* baixo sugere que a correlação é estatisticamente significativa, enquanto um *p-value* alto indica falta de evidências para afirmar tal significância. Esse critério ajudou na tomada de decisões sobre a relevância estatística das relações identificadas nas análises e conduziu a seleção das variáveis da economia circular e das tecnologias da indústria 4.0.

A análise das correlações revelou várias relações significativas entre as práticas da economia circular e as tecnologias da Indústria 4.0, destacando a importância dessas interações para a adoção tecnológica no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro.

A correlação significativa entre a prática circular "reduzir" e a tecnologia de "Big Data" destaca a importância da análise de grandes volumes de dados para identificar ineficiências e desperdícios no setor de pós-colheita do agronegócio. O uso de Big Data permite que as empresas monitorem o desempenho em tempo real, façam previsões precisas sobre a demanda e ajustem suas operações para minimizar perdas. Esses pontos não apenas promovem uma utilização mais eficiente dos recursos, mas também apoiam decisões estratégicas que estão alinhadas com os princípios da economia circular.

Os "robôs autônomos e drones" mostraram correlações fortes com práticas como "trocar" e "reduzir". Essa tecnologia possui a capacidade de automatizar tarefas repetitivas e monitorar as condições dos grãos durante o processo de pós-colheita, resultando em uma operação mais eficiente e minimizando o desperdício. Os drones, por exemplo, podem ser utilizados para inspecionar campos, enquanto os robôs podem realizar o empacotamento e transporte, facilitando a troca de informações entre as etapas do processo e contribuindo para uma melhor gestão dos recursos.

A correlação moderada entre "regenerar" e a técnica de "simulação" sugere que a modelagem de processos pode ajudar a prever cenários e a desenvolver estratégias eficazes para

aumentar a eficiência no uso de recursos. A simulação permite que os gestores testem diferentes variáveis e identifiquem as melhores práticas para otimizar a cadeia de suprimento e a conservação dos produtos pós-colheita, favorecendo práticas regenerativas que são centrais para a economia circular.

A "Internet das Coisas" revelou uma correlação forte com a prática "regenerar", demonstrando que o uso de sensores e dispositivos conectados pode melhorar a monitorização e a gestão de recursos naturais. A IoT facilita a coleta de dados em tempo real sobre as condições dos grãos, permitindo intervenções imediatas quando necessárias e promovendo a regeneração dos recursos utilizados. Essa tecnologia não só garante a qualidade do produto, mas também alinha as práticas operacionais aos objetivos de sustentabilidade.

As tecnologias de "computação em nuvem" e "blockchain" mostraram correlações fortes com a prática circular "compartilhar". Essas tecnologias aumentam a transparência e a confiabilidade nas transações, permitindo que diferentes partes interessadas compartilhem dados e informações de forma segura. Isso não apenas promove uma gestão mais colaborativa, mas também encoraja a adoção de práticas que se baseiam na economia circular ao facilitar a rastreabilidade de produtos e insumos na cadeia de suprimento.

A correlação forte entre a prática de "reciclar" e a tecnologia de "manufatura aditiva/RFID" destaca como essas inovações podem revolucionar a produção ao permitir a reutilização de materiais e componentes. A manufatura aditiva, além de reduzir desperdícios de material, possibilita a criação de produtos customizados que podem ser facilmente reparados e reciclados, contribuindo diretamente para a transição para uma economia mais circular.

Os "sistemas cibernéticos físicos" mostraram uma forte correlação com a prática "repensar", o que indica que a integração do mundo físico com o digital é importante para reimaginar processos e operações no agronegócio. Essas tecnologias possibilitam uma gestão mais eficaz e adaptativa, permitindo uma análise detalhada das operações em tempo real, que pode promover uma reflexão sobre as melhores práticas de sustentabilidade e ajustes necessários para otimizar o desempenho geral.

A correlação forte da prática de "recusar" com a "cibersegurança" reflete a necessidade de proteger informações sensíveis e garantir a integridade dos sistemas operacionais. A adoção de cibersegurança não só é necessária para prevenir perdas e fraudes, mas também para promover uma cultura de segurança que é essencial em um mundo digitalizado.

A tecnologia de "Inteligência Artificial" mostrou correlações significativas com a prática "prolongar". A IA pode fornecer oportunidade ao analisar dados extensivos para prever comportamentos, otimizar processos e reduzir o uso de recursos. Essa tecnologia permite não

apenas a manutenção preditiva, mas também a criação de estratégias que maximizam a vida útil dos produtos e insumos, alinhando-se diretamente aos objetivos da economia circular.

A análise da correlação de Spearman revelou várias correlações moderadas entre as práticas da economia circular e as tecnologias da Indústria 4.0, destacando a importância dessas relações para a adoção tecnológica no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro. As práticas de regenerar, compartilhar, otimizar, reduzir, virtualizar, trocar e reposicionar apresentaram as maiores correlações cumulativas, proporcionando ideias sobre as interações entre as tecnologias e as práticas circulares no contexto da Indústria 4.0.

Com base nas correlações significativas observadas entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas de economia circular, propõe-se um framework para a implantação dessas tecnologias no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro. Este framework visa integrar soluções digitais de forma clara, garantindo que as inovações tecnológicas não apenas melhorem a eficiência operacional, mas também promovam uma gestão sustentável que respeite os princípios da circularidade. A implementação deste modelo permitirá que as empresas do agronegócio não apenas atendam às demandas atuais de sustentabilidade, mas também se preparem para um futuro em que a eficiência e a responsabilidade ambiental são essenciais para a competitividade e a viabilidade do setor.

A análise das correlações revelou várias relações significativas entre as práticas da economia circular e as tecnologias da Indústria 4.0, destacando a importância dessas interações para a adoção tecnológica no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro. A prática de "regenerar" apresentou correlações moderadas com big data, robôs autônomos e drones, e simulação, além de uma correlação forte com a internet das coisas. Isso sugere que essas tecnologias podem ajudar a regenerar recursos ao otimizar processos e melhorar a eficiência operacional. A prática de "recusar" mostrou correlações moderadas com a internet das coisas, manufatura aditiva/RFID e sistemas cibernéticos físicos, e uma correlação forte com cibersegurança, essenciais para garantir a integridade dos sistemas e a segurança das informações, promovendo uma cultura de recusa ao desperdício e à ineficiência.

A prática de "compartilhar" teve correlações moderadas com robôs autônomos e drones, e sistemas cibernéticos físicos, além de uma correlação forte com computação em nuvem e blockchain, facilitando a colaboração e a transparência. A prática de "otimizar" mostrou correlações moderadas com robôs autônomos e drones, simulação e inteligência artificial, e uma correlação forte com big data, promovendo a análise de grandes volumes de dados e a automação de processos. A prática de "reduzir" teve correlações moderadas com big data e inteligência artificial, e uma correlação forte com robôs autônomos e drones, ajudando a

identificar e minimizar desperdícios. A prática de "reciclar" teve correlação moderada com inteligência artificial e uma correlação forte com manufatura aditiva e RFID, apoiando a reutilização de materiais e componentes.

Sendo assim:

- (i) Como propor um framework para implantação de tecnologias da indústria 4.0 que promova a economia circular no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro?

Com base nas correlações significativas observadas entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas de economia circular, propõe-se um framework para a implantação dessas tecnologias no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro.

O framework considerou as correlações significativas entre práticas circulares e tecnologias da Indústria 4.0, como Big Data para identificar ineficiências e desperdícios, robôs autônomos e drones para automatizar tarefas e monitorar condições, simulação para prever cenários e desenvolver estratégias, e Internet das Coisas para monitorar e gerenciar recursos naturais. Além disso, tecnologias como computação em nuvem e blockchain devem ser utilizadas para aumentar a transparência e confiabilidade nas transações, enquanto manufatura aditiva/RFID pode revolucionar a produção ao permitir a reutilização de materiais. Os sistemas cibernéticos físicos devem ser integrados para reimaginar processos e operações, e cibersegurança deve ser adotada para proteger informações sensíveis. A Inteligência Artificial pode fornecer oportunidades para otimizar processos e reduzir o uso de recursos. Este framework foi refinado mediante análises, contribuições e validações de especialistas, garantindo que as empresas do agronegócio não apenas atendam às demandas atuais de sustentabilidade, mas também se preparem para um futuro em que a eficiência e a responsabilidade ambiental são importantes para a competitividade e a viabilidade do setor.

A análise das correlações revelou várias relações significativas entre as práticas da economia circular e as tecnologias da Indústria 4.0, destacando a importância dessas interações para a adoção tecnológica no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro.

Com os resultados, propôs fazer a identificação e implementação das Tecnologias na fase de componentes: Iniciar com a identificação das tecnologias mais relevantes para cada prática circular, baseando-se nas correlações observadas. Sendo: sensores, drones, RFID, dispositivos de borda AIoT, Edge, IoT e robôs autônomos para coleta e análise de dados.

Para a fase de desenvolvimento de interfaces: Criar interfaces que integrem sistemas de segurança, mapas, portais na nuvem, transformação e processamento de dados, plataformas colaborativas em tempo real e interfaces de usuário. E para estabelecimento de padrões: Definir padrões abrangentes para o gerenciamento de usuários, integração de negócios, análise

avançada, gestão de energia inteligente, rastreabilidade via blockchain, monitoramento ambiental e plataformas de e-learning.

Baseou-se a implementação partindo da eficiência operacional - a implementação dessas tecnologias melhora a eficiência operacional ao automatizar tarefas, monitorar condições em tempo real e otimizar processos; da sustentabilidade para promover uma gestão sustentável dos recursos, alinhando as operações aos princípios da economia circular; da competitividade ao preparar as empresas do agronegócio para um futuro em que a eficiência e a responsabilidade ambiental são essenciais para a competitividade e a viabilidade do setor; ad inovação para facilitar a adoção de inovações tecnológicas que não apenas melhoram a eficiência, mas também promovem práticas sustentáveis e circulares.

Seguiu-se uma abordagem estruturada que integra os componentes principais, as interfaces e os padrões, alinhando-os com as práticas circulares. O desenvolvimento do framework pode ser delineado nessas três etapas principais:

Componentes Principais:

Tecnologias: Sensores, drones, RFID, dispositivos de borda AIoT, Edge, IoT, robôs autônomos: Essas tecnologias são fundamentais para a coleta e análise de dados em tempo real, permitindo uma gestão mais eficiente dos recursos.

Variáveis da Economia Circular: Regeneração, recondicionar, remanufaturar, recusar, compartilhar, trocar e reposicionar: A implementação dessas práticas circulares é facilitada pelas tecnologias mencionadas. Por exemplo, robôs autônomos e drones, que mostraram correlações fortes com práticas como "trocar" e "reduzir", podem automatizar tarefas repetitivas e monitorar as condições dos grãos, resultando em operações mais eficientes e minimizando desperdícios.

Identificando e implementando essas tecnologias para assegurar que estes componentes promovam práticas circulares como regeneração, compartilhamento, otimização e reutilização. Por exemplo, a correlação significativa entre a prática circular "reduzir" e a tecnologia de Big Data destacando a importância da análise de grandes volumes de dados para identificar ineficiências e desperdícios no setor de pós-colheita do agronegócio.

Interfaces:

Tecnologias: Transformação de dados, machine learning, realidade aumentada: Essas tecnologias são cruciais para a integração e análise avançada de dados, permitindo a otimização dos processos e a tomada de decisões informadas. A simulação, por exemplo, ajuda a prever cenários e desenvolver estratégias eficazes para "regenerar" recursos.

Variáveis da Economia Circular: Otimizar, reaproveitar, reutilizar, trocar e reposicionar: A utilização dessas práticas é potencializada pelas tecnologias de transformação de dados e machine learning, que permitem a análise detalhada e a otimização dos processos. A Internet das Coisas (IoT), que revelou uma correlação forte com a prática "regenerar", facilita a coleta de dados em tempo real sobre as condições dos grãos, promovendo intervenções imediatas quando necessário.

Desenvolver interfaces para a integração entre os sistemas de segurança, mapas, portais na nuvem, transformação e processamento de dados, plataformas colaborativas em tempo real e interfaces de usuário; garantindo que essas interfaces suportem a virtualização, otimização, reaproveitamento e reutilização dos recursos.

Padrões:

Tecnologias: Blockchain, gestão de energia, inteligência artificial, análises preditivas: Essas tecnologias estabelecem padrões para a transparência, segurança e eficiência na gestão dos recursos. A blockchain, por exemplo, aumenta a transparência e a confiabilidade nas transações, facilitando a prática de "compartilhar".

Variáveis da Economia Circular: Reparar, renovar, reciclar, circular, reduzir, prolongar, trocar e reposicionar: A adoção dessas práticas é suportada pelas tecnologias de blockchain e inteligência artificial, que permitem a rastreabilidade e a análise preditiva dos processos. A manufatura aditiva/RFID, que mostrou correlação forte com a prática "reciclar", permite a reutilização de materiais e componentes, contribuindo diretamente para a transição para uma economia mais circular.

Estabelecendo padrões abrangentes para o gerenciamento de usuários, integração de negócios, análise avançada, gestão de energia inteligente, rastreabilidade via blockchain, monitoramento ambiental e plataformas de e-learning; e assegurar assim que esses padrões incluam as práticas circulares como reparo e renovação, reciclagem e circularidade, redução e prolongamento do ciclo de vida dos produtos.

Além disso, ao aplicar as análises estatísticas, como os testes de correlação de Spearman, ajudou a compreender a influência de diferentes agentes econômicos e operacionalizar o framework de maneira a proporcionar descobertas sobre as dinâmicas e impactos das tecnologias adotadas. Este framework integrará as inovações tecnológicas com as estratégias de economia circular, promovendo a sustentabilidade e eficiência ambiental no agronegócio brasileiro.

4.4. ATUALIZAÇÃO DA ARQUITETURA DO *FRAMEWORK* PROPOSTO

Após a aplicação da metodologia de pesquisa, considerou-se a aplicação das informações obtidas para a atualização da arquitetura do *framework*, visando promover a circularidade no contexto pós-colheita do agronegócio.

Na evolução do *framework* proposto para promover a circularidade no pós-colheita do agronegócio, algumas inovações foram incorporadas em cada etapa do processo, aprimorando a eficiência e a integração de tecnologias da Indústria 4.0. A seguir, são exploradas detalhadamente as adições em cada categoria inclusa para o *framework*:

- **Componentes Principais**

- a) Computação em nuvem: abordados pelos estudos: (Sharma *et al.*, 2021), (kumar *et al.*, 2021), (Mukherjee *et al.*, 2021), (Chakrapani *et al.*, 2022), (silva *et al.*, 2022), (Varella, 2022):
 - a. Plataformas de Desenvolvimento de Aplicações (Low-Code/No-Code): Adotadas para facilitar o desenvolvimento rápido de aplicativos, permitindo agilidade na criação e modificação de soluções.
 - b. *Edge Computing*: Implementado para o processamento de dados próximo à fonte, reduzindo a latência e melhorando sua eficiência em ambientes distribuídos.
 - c. Plataformas de Colaboração em Tempo Real: Introduzidas para facilitar a comunicação e a colaboração entre equipes, promovendo eficiência, mesmo em ambientes remotos.
- b) Drones Agrícolas e RFID: Inseridos para o monitoramento aéreo de culturas, a identificação de pragas, o mapeamento de terrenos e o rastreamento de produtos ao longo da cadeia de suprimentos (Sharma *et al.*, 2021), (Fernandez *et al.*, 2021), (Krstić *et al.*, 2022), (Mahroof *et al.*, 2021), (Mariatti *et al.*, 2021), (kumar *et al.*, 2021), (Mukherjee *et al.*, 2021), (Islam *et al.*, 2022), (Skorobogatova *et al.*, 2023 *a), (Silva *et al.*, 2022), (Varella, 2022).
- c) Internet das Coisas - Sistemas de Automação de Armazéns: Implementados para gerenciar o armazenamento e a movimentação de produtos, em conjunto com AIoT, otimizando as operações pós-colheita abordados pelos estudos: (Sharma *et al.*, 2021), (Fernandez *et al.*, 2021), (Krstić *et al.*, 2022), (Mahroof *et al.*, 2021), (Mariatti *et al.*, 2021), (Kumar *et al.*, 2021), (Mukherjee *et al.*, 2021),

(Islam *et al.*, 2022), (Skorobogatova *et al.*, 2023 *a), (Silva *et al.*, 2022), (Varella, 2022).

- **Interfaces**

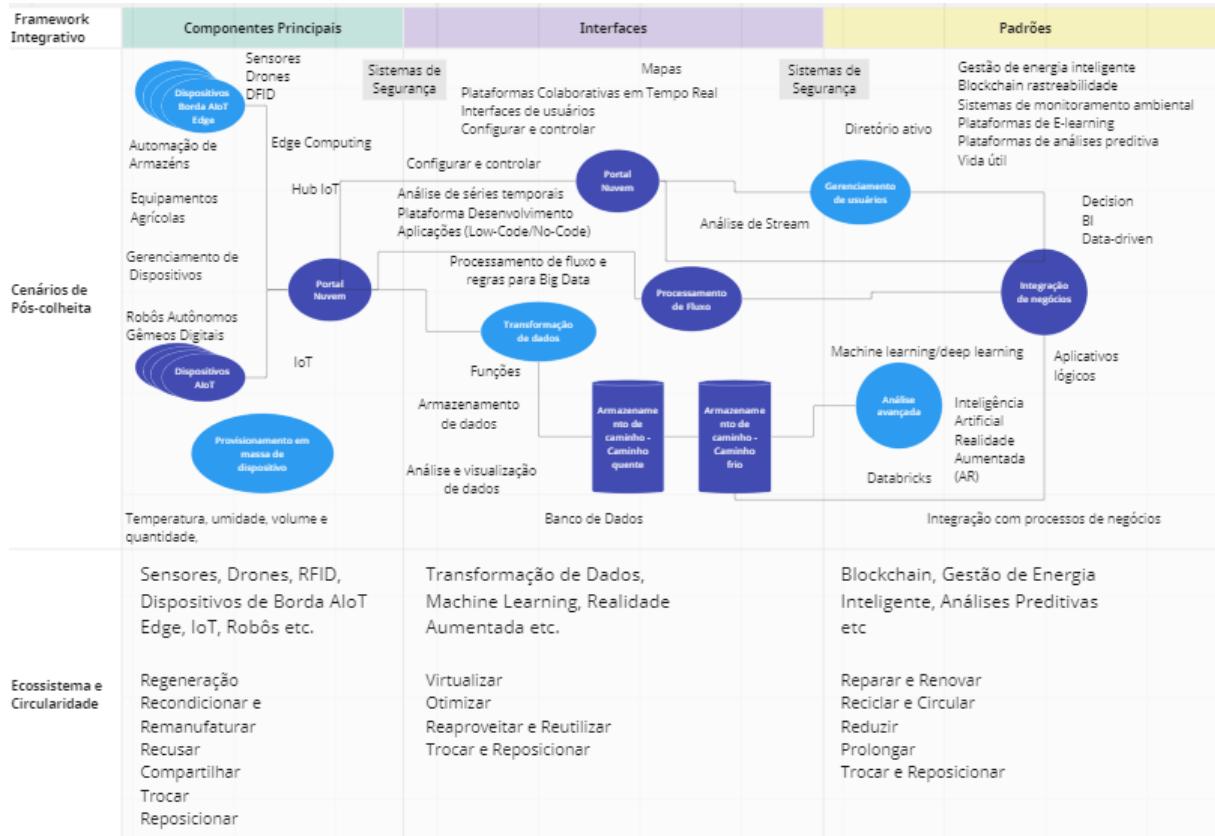
- ✓ Baseados nos estudos dos artigos: (Sharma *et al.*, 2021), (Fernandez *et al.*, 2021), (Krstić *et al.*, 2022), (Mahroof *et al.*, 2021), (Mariatti *et al.*, 2021), (Kumar *et al.*, 2021), (Mukherjee *et al.*, 2021), (Islam *et al.*, 2022), (Skorobogatova *et al.*, 2023 *a), (Silva *et al.*, 2022), (Varella, 2022), (Chakrapani *et al.*, 2022):
 - a. Plataformas de Gerenciamento de Projetos: Adotadas para facilitar o planejamento, a execução e o monitoramento de projetos relacionados ao pós-colheita.
 - b. *Chatbots* e Assistência Virtual: Introduzidos para oferecer suporte instantâneo aos usuários e clientes, melhorando a interação e a eficiência no atendimento.
 - c. Plataformas de *Marketplace* Agrícola: Integradas para conectar produtores a compradores, promovendo transações na cadeia de suprimentos.

- **Padrões**

- ✓ Baseados nos estudos dos artigos: (Sharma *et al.*, 2021), (Fernandez *et al.*, 2021), (Krstić *et al.*, 2022), (Mahroof *et al.*, 2021), (Mariatti *et al.*, 2021), (Kumar *et al.*, 2021), (Mukherjee *et al.*, 2021), (Islam *et al.*, 2022), (Skorobogatova *et al.*, 2023 *a), (Silva *et al.*, 2022), (Varella, 2022), (Chakrapani *et al.*, 2022):
 - a. Realidade Aumentada (AR): Inserida para fornecer informações contextuais sobre equipamentos e processos, melhorando a compreensão e a eficiência operacional.
 - b. Gestão de Energia Inteligente: Adotada para otimizar o consumo de energia nos processos pós-colheita, visando à sustentabilidade e à eficiência energética.
 - c. *Blockchain*: Implementado para garantir transparência e rastreabilidade nas transações ao longo da cadeia de suprimentos.
 - d. Sistemas de Monitoramento Ambiental: Utilizados para monitorar fatores ambientais, como temperatura, umidade e qualidade do ar, garantindo a qualidade dos produtos armazenados.
 - e. Plataformas de *E-learning*: Introduzidas para facilitar a capacitação e o treinamento contínuo dos colaboradores.
 - f. Plataformas de Análise Preditiva: Adotadas para antecipar eventos e tendências no agronegócio, possibilitando uma tomada de decisão informada.

A seguir, a nova proposta de *framework*, visando promover a circularidade no contexto pós-colheita do agronegócio.

Figura 13 - Framework para o setor de Pós-colheita



Fonte: Elaborado pela autora.

A estrutura evoluída pode ser implementada em fases para garantir uma transição suave à adoção do framework. São sugeridas as seguintes fases para a implementação: fase de preparação, fase com teste piloto, fase de expansão e integração dos sistemas e, por fim, fase de otimização e inovação. Ao seguir essas fases, a implementação do framework integrado será progressiva e alinhada ao objetivo de promover a circularidade no pós-colheita do agronegócio.

O plano de implementação sugere as seguintes fases: Fase de Preparação, cujo objetivo é estabelecer as bases para a adoção do framework, envolve atividades como a identificação e aquisição de Internet das Coisas e dispositivos de borda (AIoT), sensores e sistemas de gerenciamento de dispositivos, implementação de cibersegurança para garantir a proteção dos dados, integração de drones para monitoramento aéreo e RFID para rastreamento, além do treinamento da equipe e conscientização sobre as práticas circulares.

Na Fase com Teste Piloto, o objetivo é avaliar a eficácia do framework em um ambiente controlado, com atividades como a implantação de robôs autônomos e sistemas de automação

de armazéns, utilização de plataformas de colaboração em tempo real para facilitar a comunicação, implementação de inteligência artificial e plataformas de desenvolvimento de aplicações para a transformação de dados, e testes de chatbots e assistência virtual para suporte instantâneo.

A fase de Expansão e Integração dos Sistemas tem como objetivo ampliar a implementação para toda a cadeia do pós-colheita do agronegócio, com atividades como a expansão do uso de inteligência artificial e machine learning para análise avançada, integração de sistemas de gestão de projetos e plataformas de marketplace agrícola, implementação de realidade aumentada para fornecer informações contextuais, e adoção de blockchain para garantir transparência e rastreabilidade.

Na fase de Otimização e Inovação, o objetivo é refinar e inovar continuamente o framework, com atividades como a aplicação de plataformas de análise preditiva para antecipar eventos, utilização de sistemas de monitoramento ambiental com sensores, integração de plataformas de e-learning para capacitação contínua, e exploração de tecnologias da Indústria 4.0 para manter o framework atualizado.

Ao seguir essas fases, a implementação progressiva e cuidadosa do framework promoverá efetivamente a circularidade no pós-colheita do agronegócio, incorporando as práticas circulares e criando interconexão entre as fases da adoção das tecnologias e das práticas circulares.

Os componentes principais incluem sensores, drones, RFID, dispositivos de borda AIoT Edge, IoT, robôs, entre outros. A utilização de sensores para monitorar a qualidade de materiais e regenerar produtos com base em dados em tempo real, a implementação de drones para localizar e recolher produtos para recondicionamento, o uso de robôs para desmontagem e remanufatura, a utilização de sensores para identificar produtos ou materiais que não atendam aos padrões de qualidade e descarte automático, e a criação de plataformas de compartilhamento de recursos utilizando RFID e IoT para otimizar o uso de produtos e materiais são algumas das práticas sugeridas.

As interfaces incluem transformação de dados, machine learning, realidade aumentada, entre outras. A utilização de realidade aumentada para criar modelos virtuais de produtos, facilitando o design para a reciclagem, a aplicação de algoritmos de machine learning para otimizar processos de reciclagem e reaproveitamento de materiais, e o desenvolvimento de interfaces de usuário intuitivas para promover o reaproveitamento de produtos e materiais são algumas das práticas sugeridas.

Os padrões incluem blockchain, gestão de energia inteligente, análises preditivas, entre outros. A aplicação de plataformas de análises preditivas para antecipar a necessidade de reparos em produtos, prolongando sua vida útil, a implementação de blockchain para rastrear o ciclo de vida dos produtos e facilitar sua reciclagem, a utilização de análises avançadas para identificar oportunidades de redução de resíduos em cada fase do ciclo de vida do produto, e a aplicação de sistemas de monitoramento de dispositivos para prolongar a vida útil de equipamentos são algumas das práticas sugeridas.

Práticas adicionais em todas as fases incluem a utilização de plataformas de marketplace agrícola e sistemas de monitoramento ambiental para facilitar a troca e o reposicionamento de produtos. O desenvolvimento do framework para promover a circularidade no pós-colheita do agronegócio representa um avanço, impulsionado pela colaboração com especialistas.

A evolução do framework reflete inovações em cada categoria, destacando melhorias substanciais na eficiência e integração das tecnologias da Indústria 4.0. A introdução de elementos como inteligência artificial para aprimorar a compreensão textual, assim como plataformas de desenvolvimento ágil e o uso estratégico de Edge Computing e novas tecnologias agrícolas demonstra um compromisso com a excelência na gestão pós-colheita.

A proposta de implementação em fases oferece uma abordagem estratégica e adaptativa. A fase de preparação estabelece as bases com a aquisição de dispositivos e cibersegurança, enquanto o teste piloto permite avaliar sua eficácia em um ambiente controlado. A expansão e a integração dos sistemas garantem uma implementação ampla, e a fase final de otimização e inovação promove a contínua evolução do sistema. Esse planejamento reflete um compromisso com uma transição gradual.

Ao incorporar as práticas circulares em todas as fases, desde a regeneração e recondicionamento até a reciclagem e redução de resíduos, o framework proposto não apenas integra as tecnologias da Indústria 4.0, mas também promove a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental. A interconexão entre as fases da adoção tecnológica e as práticas circulares evidencia uma abordagem holística para a promoção da circularidade no pós-colheita do agronegócio. Essa estratégia integrada, como ilustrado na **Figura 13**, oferece uma visão abrangente e orientada para o futuro do framework proposto.

Com a implementação progressiva e cuidadosa dessas fases, o framework está bem-positionado para promover efetivamente a circularidade no pós-colheita do agronegócio. Essa abordagem não apenas atende às demandas atuais do setor, mas também se adapta e inova para enfrentar os desafios futuros, consolidando-se como uma contribuição para a evolução sustentável do agronegócio.

5. DISCUSSÕES

A análise focou no impacto das tecnologias na circularidade dos processos do agronegócio, destacando a importância do setor pós-colheita para a economia e o emprego no Brasil, além de seu impacto ambiental significativo.

A correlação entre as tecnologias da Indústria 4.0, como Robôs Autônomos, Big Data, Internet das Coisas, computação em nuvem, manufatura aditiva, sistemas cibernéticos e Inteligência Artificial, e as práticas circulares de recusar, trocar, reposicionar, regenerar, otimizar, reduzir, virtualizar e reciclar revela uma interseção significativa entre a inovação tecnológica e os princípios da economia circular. Este estudo encontrou correlações moderadas e fortes entre a adoção dessas tecnologias na Indústria 4.0 e a implementação das práticas circulares mencionadas, sugerindo uma sinergia robusta entre a automação avançada e a busca pela sustentabilidade ambiental. A integração dessas tecnologias não só facilita a eficiência operacional, mas também promove práticas sustentáveis no setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro.

Para a prática circular de *recusar*, Mariatti *et al.* (2021) destacaram a importância da valorização de resíduos e subprodutos como uma etapa essencial para fechar os fluxos de materiais e promover recusas eficazes. Além disso, Kumar *et al.* (2021) observaram a falta de aspectos de design circular em recusas, ressaltando a necessidade de produtos reutilizáveis e recicláveis. Chakrapani *et al.* (2022) trouxeram uma perspectiva inovadora, ao explorarem a aplicação de constituintes químicos originários de plantas para práticas circulares, como o colágeno, a queratina e outros, focando na recusa como uma estratégia circular.

No contexto da prática circular de *trocar*, Mahroof *et al.* (2021) enfatizaram a importância da mudança de cultura e da integração do trabalho para torná-los mais produtivos, abordando as trocas dentro do paradigma da economia circular. Mahroof *et al.* (2021) evidenciam que a implementação da estrutura ReSOLVE, juntamente com o uso de drones, oferece oportunidades significativas para superar os desafios agrícolas. Esse enfoque não apenas aborda questões relacionadas à “estrutura agrícola” e à “segurança alimentar”, mas também destaca a importância de mitigar o “impacto ambiental” por meio de práticas mais sustentáveis e éticas.

Já para a prática de *reposicionar*, Mahroof *et al.* (2021) e Chakrapani *et al.* (2022) discutiram diferentes aspectos. Os primeiros destacaram o reposicionamento para a aplicação de defensivos agrícolas perigosos, enquanto os segundos propuseram projetos para reposicionar o uso de resíduos e materiais como uma alternativa eficaz na gestão de resíduos de alimentos.

A variável *reposicionar*, conforme discutido por Varella (2022), é essencial para a transição para uma economia circular na agricultura 4.0. A pesquisa propõe uma arquitetura integrada, que visa identificar as tecnologias da Indústria 4.0 adotadas na agricultura e promover a economia circular por meio do *framework* ReSOLVE. Essa abordagem estratégica busca alinhar os avanços tecnológicos com os princípios da sustentabilidade e da eficiência na utilização de recursos.

Esses achados corroboram a importância da tecnologia da indústria 4.0 de Robôs Autônomos como facilitadora-chave para a implementação bem-sucedida de práticas circulares, oferecendo novas oportunidades para a otimização de processos, a redução de resíduos e a criação de valor sustentável. Essa convergência entre inovação tecnológica e princípios circulares pode impulsionar a transformação positiva em direção a uma economia mais circular e sustentável.

A pesquisa revelou uma forte correlação entre a adoção de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 e a promoção de práticas de economia circular na pós-colheita do agronegócio. Especificamente, os estudos destacaram a importância das economias circulares de *trocar* e *reposicionar* (Mahroof et al., 2021; Varella, 2022). Essas práticas enfatizam a reutilização de recursos e a otimização de processos, contribuindo para a redução de resíduos e o aumento da eficiência na cadeia de valor agrícola. A integração de tecnologias como robôs autônomos, big data, internet das coisas, inteligência artificial, computação em nuvem e blockchain demonstra uma sinergia robusta entre a automação avançada e a sustentabilidade ambiental, promovendo uma economia circular mais eficiente e sustentável no setor de pós-colheita.

Além das práticas da economia circular de *trocar* e *reposicionar*, os estudos também destacaram a relevância das práticas de *regenerar* e *prolongar* (Mahroof et al., 2021; Chakrapani et al., 2022; Varella, 2022). A prática de *regenerar* enfoca a restauração e a conservação dos recursos naturais, enquanto *prolongar* visa estender a vida útil dos produtos e materiais, reduzindo, assim, a geração de resíduos.

Mahroof et al. (2021) e Chakrapani et al. (2022) discutem como a prática de *regenerar* pode ser alcançada por meio da implementação de práticas sustentáveis na agricultura, como o manejo adequado do solo e o reflorestamento. Essas medidas não só contribuem para a conservação da biodiversidade e dos recursos hídricos, mas também promovem a resiliência dos ecossistemas agrícolas frente às mudanças climáticas.

Em relação a *prolongar*, Chakrapani et al. (2022) destacam a importância da gestão eficiente de recursos para reduzir o desperdício e prolongar a vida útil dos produtos agrícolas. Isso inclui a implementação de tecnologias de monitoramento e rastreamento ao longo da cadeia

de suprimentos, permitindo uma melhor gestão de inventário e uma redução significativa de perdas.

Outra prática relevante identificada nos estudos é *virtualizar*, que se refere à digitalização e automação de processos na agricultura (Fernandez *et al.*, 2021; Mahroof *et al.*, 2021; Mukherjee *et al.*, 2021; Varella, 2022). Essa abordagem visa aumentar a eficiência operacional e reduzir o consumo de recursos por meio da otimização de processos e da tomada de decisão baseada em dados. Fernandez *et al.* (2021) destacam como a prática de *virtualizar* pode melhorar a gestão de fazendas por meio de sistemas de monitoramento remoto e da análise de dados em tempo real. Essa tecnologia amplia a precisão no gerenciamento de recursos como irrigação e fertilização, resultando em economias significativas de água e insumos agrícolas.

Mahroof *et al.* (2021) e Varella (2022) complementam essa discussão enfatizando que *virtualizar* também pode ser aplicada na gestão pós-colheita, permitindo uma melhor rastreabilidade dos produtos e uma maior eficiência na logística de armazenamento e distribuição.

Sendo assim, os resultados destacam a importância da integração entre as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 e as práticas de economia circular na pós-colheita do agronegócio. Essa abordagem não apenas promove a eficiência e a sustentabilidade na produção agrícola, como também contribui para a mitigação dos impactos ambientais e para a promoção de uma agricultura mais resiliente e ética.

A análise dos resultados revelou que as práticas de economia circular com menores índices de correlação na pós-colheita do agronegócio, abordadas durante a pesquisa, incluem recondicionar, remanufaturar, repensar e prolongar, conforme discutido em diversos estudos (Sharma *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2021; Islam *et al.*, 2022; Skorobogatova *et al.*, 2023a; Varella, 2022). Além disso, a prática de ciclar também foi mencionada, embora com menor frequência (Fernandez *et al.*, 2021; Krstic *et al.*, 2022; Mahroof *et al.*, 2021; Belaud *et al.*, 2019; Chakrapani *et al.*, 2022; Varella, 2022). Essas práticas sugerem oportunidades adicionais para promover a sustentabilidade na pós-colheita do agronegócio, especialmente considerando o contexto atual de aumento populacional e seus impactos negativos ao meio ambiente (Skorobogatova *et al.*, 2023a).

As considerações de Skorobogatova *et al.* (2023*a) ressaltam a necessidade de reavaliar o modelo organizacional de negócios, especialmente na agricultura, considerada uma das principais fontes de poluição ambiental. Skorobogatova *et al.* (2023*a) propõem, em seu estudo, um modelo de ecossistema de agronegócio que promova o desenvolvimento equilibrado com base em quatro áreas: econômica, social, ambiental e inovadora. Destaca-se a importância

de soluções inovadoras baseadas na transição para um modelo de economia circular, utilizando ferramentas da Indústria 4.0 em todos os níveis de gestão do sistema.

Fernandez *et al.* (2021) destacam as oportunidades oferecidas pelo uso de embalagens inteligentes e ativas para rastrear e prolongar a vida útil dos produtos, contribuindo, assim, para a evolução da circularidade de produtos na pós-colheita do agronegócio. Essa abordagem promissora pode mitigar o desperdício e aumentar a eficiência na cadeia de suprimentos agrícolas.

Os resultados do estudo de Krstić *et al.* (2022) indicam que as áreas de interesse que mais contribuem para a sustentabilidade do sistema de economia circular no setor agroalimentar incluem *Reutilização, Remanufatura, Reciclagem*, além de Supply Chain Management (SCM) e Product Lifecycle Management (PLM). Esses achados fornecem observações para orientar futuras ações e políticas voltadas à implementação da economia circular na pós-colheita do agronegócio.

Kumar *et al.* (2021) identificaram obstáculos significativos para a implementação do modelo I4.0-CE, como falta de apoio governamental e políticas inadequadas. Esses resultados destacam a importância de estratégias de implantação bem planejadas para promover a adoção bem-sucedida da Indústria 4.0 e da economia circular na cadeia de abastecimento agrícola.

Portanto, os achados sugerem que a adoção de práticas de economia circular menos correlacionadas, como *recondicionar / Remanufaturar / Repensar e Prolongar*, pode oferecer oportunidades adicionais para promover a sustentabilidade na pós-colheita do agronegócio. Essas práticas, juntamente com a implementação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, têm o potencial de transformar positivamente a cadeia de valor agrícola, garantindo eficiência, redução de resíduos e resiliência ambiental.

Os estudos que trataram especificamente da Internet das Coisas são de Sharma *et al.* (2021), Fernandez *et al.* (2021), Krstic *et al.* (2022), Mahroof *et al.* (2021), Mariatti *et al.* (2021), Kumar *et al.* (2021), Mukherjee *et al.* (2021), Islam *et al.* (2022), Skorobogatova *et al.* (2023 a), Silva *et al.* (2022) e Varella (2022). Esses estudos ofereceram interpretações sobre como a Internet das Coisas pode ser aplicada no contexto do agronegócio para promover práticas de economia circular. Importante salientar, segundo Kasera *et al.* (2024), que a Internet das Coisas em conjunto com Inteligência Artificial AIoT, vem revolucionando a coleta e gestão dos dados.

Sharma *et al.* (2021) identificaram que a Internet das Coisas desempenha seu papel na adoção da economia circular por meio de tecnologias da Indústria 4.0, contribuindo para aspectos como rastreabilidade, transparência e cibersegurança aprimorada. Fernandez *et al.*

(2021) destacaram as oportunidades oferecidas pelo uso de dispositivos IoT para rastrear e prolongar a vida útil dos produtos na cadeia de suprimentos agrícolas. Krstić *et al.* (2022) e Mariatti *et al.* (2021) exploraram como a IoT pode ser integrada aos protocolos de economia circular e Indústria 4.0 para gerar novos produtos e negócios sustentáveis no agronegócio. Além disso, outros estudos, como o de Silva *et al.* (2022) e Varella (2022) mapearam as tecnologias da Indústria 4.0 adotadas por startups de foodtech para promover a economia circular, destacando a presença proeminente da IoT nessas iniciativas.

As considerações de Sharma *et al.* (2021) destacam 10 fatores que influenciam a adoção da economia circular por meio das tecnologias da Indústria 4.0, incluindo aspectos como rastreabilidade, transparência, redução de custos e tempo de transação, cibersegurança aprimorada e conectividade contínua e fluxo de informações.

Já Mariatti *et al.* (2021) abordaram de forma integrada os protocolos de economia circular e indústria 4.0 para gerar novos produtos e negócios sustentáveis no setor do agronegócio de cacau, evidenciando benefícios ambientais e econômicos.

Kazancoglu *et al.* (2022) identificaram desafios como implicações políticas e gerenciais, falta de conscientização das partes interessadas e falta de regulamentações governamentais como obstáculos para a circularidade dos alimentos e a redução do desperdício alimentar. Silva *et al.* (2022) mapearam as tecnologias da Indústria 4.0 adotadas por startups de foodtech para o sucesso da economia circular, destacando a importância dessas tecnologias para superar obstáculos e equilibrar os pilares da economia circular nas dimensões ambiental, econômica e social.

Segundo, Belaud *et al.* (2019) enfatizaram a utilização de big data para melhorar a gestão da sustentabilidade no design da cadeia de abastecimento, visando valorizar resíduos agrícolas e promover a produção sustentável de bioenergia, biomoléculas e biomateriais.

Essas considerações ressaltam a importância das tecnologias da Indústria 4.0 na promoção da economia circular no agronegócio, ao mesmo tempo em que destacam os desafios e oportunidades associados à sua implementação e integração nos processos do pós-colheita.

Ao analisar os resultados, fica evidente que as tecnologias da Indústria 4.0 com menor índice de correlação, como Simulação e Realidade Aumentada, desempenham um papel significativo na busca por soluções sustentáveis no agronegócio pós-colheita. Essas tecnologias oferecem potenciais benefícios, que vão desde a melhoria da eficiência operacional até a promoção de práticas mais sustentáveis e econômicas.

O estudo de Mukherjee *et al.* (2021) destaca os benefícios do blockchain na gestão da cadeia de suprimentos agrícolas, incluindo aspectos como privacidade de dados,

descentralização e sustentabilidade aprimorada. A adoção do blockchain pode garantir a transparência e a rastreabilidade dos produtos, mitigando riscos e promovendo práticas mais éticas e sustentáveis na cadeia de suprimentos.

Chakrapani *et al.* (2022) abordam a importância da gestão do desperdício alimentar e destacam como a economia circular pode ser uma solução para esse desafio. A integração de novos paradigmas de negócios, como a economia circular e a Indústria 4.0, pode promover a valorização de resíduos alimentares e contribuir para a sustentabilidade do setor agrícola.

Mariatti *et al.* (2021) exploram a integração de protocolos de economia circular e Indústria 4.0 no setor do agronegócio de cacau. Ao adotar tecnologias habilitadoras emergentes, como a Impressão 3D e Manufatura Aditiva, é possível gerar novos produtos e negócios sustentáveis, além de valorizar os subprodutos do cacau e promover uma produção mais sustentável.

Varella (2022) propõe uma arquitetura integrada para promover a economia circular na agricultura 4.0. Ao identificar e adotar tecnologias da Indústria 4.0, é possível impulsionar a transição para práticas mais sustentáveis no agronegócio, garantindo a eficiência e a viabilidade econômica das operações.

Silva *et al.* (2022) destacam a importância do empoderamento das pessoas para o uso das tecnologias da Indústria 4.0 e a democratização do acesso a modelos de negócios sustentáveis. Além disso, ressaltam o papel dos ativos inteligentes e as oportunidades estratégicas para promover a economia circular apoiada por tecnologias da Indústria 4.0.

Esses estudos fornecem descobertas sobre como as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser aplicadas no agronegócio pós-colheita para promover práticas mais sustentáveis e eficientes. Ao adotar abordagens integradas e inovadoras, é possível ultrapassar os desafios enfrentados pelo setor e garantir sua sustentabilidade a longo prazo.

A pesquisa foi guiada pela premissa de analisar a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 e seu impacto na circularidade dos processos no setor de agronegócio, dada a relevância econômica e ambiental do segmento pós-colheita. Dentre as principais referências que embasaram essa análise, destacam-se os estudos de Santos *et al.* (2023), que ressaltam a importância do agronegócio brasileiro como fonte de empregos; e do MAPA (2023), que aponta que as exportações do agronegócio representaram 47,6% do total exportado pelo Brasil em 2022, evidenciando sua relevância econômica.

Autores como Gomes (2019) enfatizam o impacto ambiental da produção de *commodities* no Brasil, ressaltando a necessidade de redução dos impactos ambientais por meio da adoção de práticas de economia circular e tecnologias da Indústria 4.0. Estudos como os de

Sharma *et al.* (2021), Fernandez *et al.* (2021), Mahroof *et al.* (2021), Mariatti *et al.* (2021), Chakrapani *et al.* (2022), Kazancoglu *et al.* (2022), Skorobogatova *et al.* (2023a), Skorobogatova *et al.* (2023b), Silva *et al.* (2022) e Varella (2022) também contribuíram para a compreensão dos desafios e oportunidades relacionados à adoção de práticas de economia circular e tecnologias da Indústria 4.0 no agronegócio.

Autores como Mariatti *et al.* (2021), Kumar *et al.* (2021) e Chakrapani *et al.* (2022) destacaram a importância da valorização de resíduos, da mudança cultural e da integração do trabalho como aspectos essenciais para implementar práticas circulares como *recusar*, *trocar* e *reposicionar*. Essas contribuições, juntamente com as análises de outros pesquisadores mencionados anteriormente, forneceram uma base para a compreensão da relação entre as tecnologias da Indústria 4.0, a economia circular e o agronegócio pós-colheita.

O trabalho de pesquisa foi realizado com o objetivo de verificar como a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 promove práticas circulares para o setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro e, como resultado, propor uma arquitetura de framework que promova as práticas da economia circular para esse sistema. A pesquisa foi dividida em etapas, e a primeira consistiu em uma revisão sistemática da literatura que incluiu 14 pesquisas. Nenhuma dessas pesquisas, abordou um framework para serviços integrados no agronegócio. Sendo assim, foram consideradas as variáveis da economia circular abordadas pelos autores e as tecnologias da Indústria 4.0, orientando a segunda etapa da pesquisa e o desenvolvimento da estrutura proposta.

A investigação conduzida neste trabalho teve como premissa a análise da adoção das tecnologias da Indústria 4.0 e seu impacto na circularidade dos processos no setor do agronegócio. Isso porque o setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro está entre as principais fontes de emprego do país (Santos *et al.*, 2023), e as exportações do agronegócio representaram 47,6% do total exportado pelo Brasil em 2022 (MAPA, 2023). Dada a relevância econômica e ambiental da produção de *commodities* no Brasil (Gomes, 2019), é essencial investigar estratégias para reduzir os impactos ambientais por meio de práticas de economia circular em conjunto com tecnologias da Indústria 4.0, minimizando o consumo de recursos durante os processos (Sharma *et al.*, 2021; Fernandez *et al.*, 2021; Mahroof *et al.*, 2021; Mariatti *et al.*, 2021; Chakrapani *et al.*, 2022; Kazancoglu *et al.*, 2022; Skorobogatova *et al.*, 2023a; Skorobogatova *et al.*, 2023b; Silva *et al.*, 2022; Varella, 2022).

A aplicação de análises estatísticas, como os testes de correlação de Spearman, pode ajudar a compreender a influência de diferentes agentes econômicos e operacionalizar o framework, proporcionando oportunidades sobre as dinâmicas e impactos das tecnologias

adotadas. Este framework integrará as tecnologias com as estratégias de economia circular, promovendo a sustentabilidade e eficiência ambiental no agronegócio brasileiro.

A integração das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 com práticas de economia circular no setor pós-colheita do agronegócio brasileiro não apenas promove a eficiência e a sustentabilidade para o agronegócio brasileiro, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais, fomentando uma produção resiliente e ética. A adoção estratégica dessas tecnologias pode transformar a cadeia de valor agrícola, promovendo a redução de resíduos, eficiência operacional e resiliência ambiental.

6. CONCLUSÃO

Este estudo se propôs a verificar como a adoção das tecnologias da indústria 4.0 promovem práticas circulares para o setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro e como resultado desenvolveu uma arquitetura de *framework* que promova as práticas da economia circular para o sistema. Por meio de uma análise abrangente e estruturada, identificou-se correlações significativas entre a adoção de tecnologias específicas da Indústria 4.0 e a promoção de práticas circulares no setor de pós-colheita do agronegócio.

No que diz respeito às contribuições para a teoria e o avanço do conhecimento, este estudo oferece oportunidade sobre a interseção entre inovação tecnológica e os princípios da economia circular no agronegócio. Além disso, ao propor um *framework* abrangente, contribui-se para a consolidação de um guia prático que pode orientar a implementação eficaz de soluções sustentáveis em toda a cadeia de valor do agronegócio pós-colheita. Essa contribuição para a teoria é reforçada pela identificação de lacunas de pesquisa e áreas pouco exploradas, que oferecem oportunidades adicionais para investigações futuras.

Em específico para a área de Informática e Gestão do Conhecimento, a implantação do framework proposto auxilia na coleta, armazenamento e análise de grandes volumes de dados gerados no setor de pós-colheita. O resultado deste estudo fornece uma base para a criação de uma infraestrutura digital alinhada às práticas de economia circular. Isso representa um avanço para a informática aplicada, pois o framework proposto pode ser utilizado como base para desenvolver sistemas mais inteligentes e interconectados, que são essenciais para a modernização do setor.

Quanto às contribuições para práticas empresariais e para a sociedade, este estudo oferece orientações claras e aplicáveis para as empresas do setor de agronegócio interessadas em promover a sustentabilidade e a eficiência em suas operações. Ao destacar a importância da adoção de práticas circulares e tecnologias da Indústria 4.0, contribui-se para o avanço de uma abordagem mais sustentável e responsável na gestão dos recursos agrícolas. Além disso, ao promover a implementação de soluções inovadoras, este estudo tem o potencial de gerar impactos positivos tanto no ambiente de negócios quanto na sociedade como um todo.

Em relação às limitações do estudo, reconhecemos que a análise se concentrou principalmente em uma perspectiva específica do setor de pós-colheita do agronegócio brasileiro, o que pode limitar a generalização dos resultados para outros contextos ou segmentos do agronegócio. Ademais, a complexidade e a dinâmica do ambiente de pesquisa podem ter influenciado a abrangência e a profundidade da análise.

Para pesquisas futuras, sugere-se explorar mais a fundo as áreas pouco exploradas identificadas neste estudo, como *recondicionar, remanufaturar, ciclar, repensar e prolongar*, assim como incentivar a realização de estudos longitudinais e comparativos que avaliem o impacto, a longo prazo, da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e práticas circulares no agronegócio. Outras áreas de pesquisa promissoras incluem o desenvolvimento de embalagens inteligentes e ativas, bem como a gestão sustentável da cadeia de abastecimento, com foco em reutilização, remanufatura, reciclagem e gerenciamento do ciclo de vida do produto.

Em suma, este estudo destaca a importância da integração de tecnologias da Indústria 4.0 e práticas da economia circular para promover a sustentabilidade e a eficiência no agronegócio pós-colheita. Ao oferecer interpretações práticas e orientações para a implementação eficaz dessas soluções, esperamos contribuir para a construção de um futuro mais sustentável e resiliente para o setor agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAG. Visão da inovação e da competitividade do agronegócio.** Brasil, 2023. Site. Disponível em: <https://abag.com.br/position-paper-2023-a-visao-da-inovacao-e-da-competitividade-do-agronegocio/>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- ALDHYANI, Theyazn HH; ALKAHTANI, Hasan. Cyber Security for Detecting Distributed Denial of Service Attacks in Agriculture 4.0: Deep Learning Model. **Mathematics**, v. 11, n. 1, p. 233, 2023.
- ALVES, Rik Ferreira. Atlas do agronegócio: fatos e números sobre as corporações que controlam o que comemos. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 3, n. 01, p. 222-227, 2021.
- AMIS. Sistema de Informação do Mercado Agrícola: Soja.** [S. l.], 2023. Site. Disponível em: <https://www.amis-outlook.org/amis-monitoring/crop-monitor/soybean/en/>. Acesso em: 21 maio 2023.
- ARAÚJO, Sara Oleiro *et al.* Characterising the agriculture 4.0 landscape—emerging trends, challenges and opportunities. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 667, 2021.
- AVELLA, J. R. Delphi panels: Research design, procedures, advantages, and challenges. **International Journal of Doctoral Studies**, [S. l.], v. 11, p. 305-321, 2016. Disponível em: <https://ijds.org/Volume11/IJDSv11p305-321Avella2434.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- BELAUD, J. P.; PRIOUX, N.; VIALLE, C.; SABLAYROLLES, C. Big data for agri-food 4.0: Application to sustainability management for by-products supply chain. **Computers in Industry**, v. 111, p. 41-50, 2019.
- BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.** PCA - Programa para Construção e Ampliação de Armazéns. Disponível em: <<https://www.bnDES.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pca>>. Acesso em: 13/01/2024
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária.** Exportações do agronegócio fecham 2022 com US\$ 159 bilhões em vendas. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/exportacoes-do-agronegocio-fecham-2022-com-us-159-bilhoes-em-vendas>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- BRYMAN, A. Research methods and organization studies. Canada; USA: **Routledge**, 2003.
- CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada.** Relatório: PIB do Agronegócio Brasileiro, Cepea, 21/12/2023.
- CEPEA. Pib do agronegócio brasileiro.** São Paulo, 2023. Site. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx#:~:text=Considerando%2Dse%20os%20desempenhos%20da,pecu%C3%A1ria%20avan%C3%A7ou%202%2C11%25>. Acesso em: 01 jun. 2023.

CHAKRAPANI, Gayathri; ZARE, Mina; RAMAKRISHNA, Seeram. Biomaterials from the value-added food wastes. **Bioresource Technology Reports**, p. 101181, 2022.

CHRIST, G. D. et al. O agronegócio brasileiro no comércio internacional: vulnerabilidade, retrocesso, oportunidade perdida ou situação ótima? **Informe GEPEC**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 190-209, 2022. DOI: 10.48075/igepec.v26i2.28426. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/28426>. Acesso em: 15 jun. 2023.

CNA Brasil. **Perspectivas 2020: Análise Econômica e Agrícola do Brasil**. Brasília: Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2020

COGO, C. Relatório Brasil Overview 2023/2024. Acesso restrito. Disponível em: https://www.carloscogo.com.br/cgi-bin/recent_rep.php. Acesso em: 01 jun. 2023.

COHEN, J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2. ed. **New York: Lawrence Erlbawn**, 1988.

DA SILVA MEDINA, Gabriel. Economia do agronegócio no Brasil: participação brasileira na cadeia produtiva da soja entre 2015 e 2020. **Novos cadernos NAEA**, v. 24, n. 1, 2021.

DA SILVA OLIVEIRA, L. K.; LOPES, R. S.; DOS SANTOS, W. J. C. Relevância do agronegócio na economia brasileira. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 16, p. 01-06, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38493>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366332009_Relevancia_do_agronegocio_na_economia_brasileira. Acesso em: 18 jun. 2023.

DAVIS, Nicholas et al. What is the fourth industrial revolution. In: **World economic forum**. 2016. p. 388.

DE OLIVEIRA NETO, G. C.; DA CONCEIÇÃO SILVA, A.; FILHO, M. G. How can Industry 4.0 technologies and circular economy help companies and researchers collaborate and accelerate the transition to strong sustainability? A bibliometric review and a systematic literature review. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04234-4>. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 3483-3520, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-022-04234-4>. Acesso em: 21 jun. 2023.

DI MARIA, E.; DE MARCHI, V.; GALEAZZO, A. Industry 4.0 technologies and circular economy: The mediating role of supply chain integration. **Business Strategy and the Environment**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 619-632, 2022. DOI: 10.1002/bse.2940. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/bla/bstrat/v31y2022i2p619-632.html>. Acesso em: 23 jun. 2023.

EISENHARDT, K. M. Building Theories from Case Study Research. **Academy of Management Review**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989. <https://doi.org/10.2307/258557>. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/258557?typeAccessWorkflow=login>. Acesso em: 15 jun. 2023.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>. Acesso em: 28 jun. 2023.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Colheita e pós-colheita. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/27311/1/Colheita-pos-colheita-Secagem.pdf>. Acessado 07/12/2023.

EUROPEAN COMMISSION. Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Bruxelas, 2015. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF. Acesso em: 03 jul. 2023.

FAO, Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. Perspectivas Agrícolas 2021-2030, 2023.

FEDERAL, SUPERINTENDÊNCIA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Novos processos de governança e modernização estão entre as ações de destaque no Mapa em 2023, 2023.

FERNANDEZ, C. M.; ALVES, J.; GASPAR, P. D.; LIMA, T. M. Fostering Awareness on Environmentally Sustainable Technological Solutions for the Post-Harvest Food Supply Chain. **Processes**, v. 9, n. 9, p. 1611, 2021.

FORZA, C. Survey research in operations management: a process-based perspective. **International journal of operations & production management**, [S. l.J, v. 22, n. 2, p. 152-194, 2002. Disponível em: <https://www.deepdyve.com/lp/emerald-publishing/survey-research-in-operations-management-a-process-based-perspective-Z5O8OjUBK0>. Acesso em: 15 jun. 2023.

GOMES, C. S. Impactos da expansão do agronegócio brasileiro na conservação dos recursos naturais. **Cadernos do Leste**, Belo Horizonte, v. 19, n. 19, p. 63-78, 2019. DOI: <https://doi.org/10.29327/248949.19.19-4>. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/caderleste/article/view/13160>. Acesso em: 14 jul. 2023.

HEREDIA, Beatriz; PALMEIRA, Moacir; LEITE, Sergio Pereira. Sociedade e economia do "agronegócio" no Brasil. **Revista brasileira de ciências sociais**, [S. l.J, v. 25, n. 74, p. 159-176, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-69092010000300010>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcsoc/a/r5ZkZNpbHDqKckcBxrDSxrS/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 17 jun. 2023.

IPBES. The Insect Apocalypse, and How to Stop It. **Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services**, 2019.

ISLAM, Md Tasbirul; IYER-RANIGA, Usha; TREWICK, Sean. Recycling Perspectives of Circular Business Models: A Review. **Recycling**, v. 7, n. 5, p. 79, 2022.

JOHNSON, Ralph E.; DEUTSCH, Peter. How to design frameworks. **Notes for OOPSLA**, v. 93, 1993.

KASERA, Rohit Kumar; GOUR, Shivashish; ACHARJEE, Tapodhir. A comprehensive survey on IoT and AI based applications in different pre-harvest, during-harvest and post-harvest activities of smart agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 216, p. 108522, 2024.

KASTNER, T., et al. Global changes in diets and their environmental impacts. **Nature Sustainability**, 3(10), 779-787, 2020.

KAZANCOGLU, Ipek *et al.* Food waste management in the retail sector: challenges that hinder transition to circular economy. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 24, n. 2, p. 655-666, 2022.

KRSTIĆ, Mladen *et al.* Logistics 4.0 toward circular economy in the agri-food sector. **Sustainable Futures**, v. 4, p. 100097, 2022.

KUMAR, S.; RAUT, R. D.; NAYAL, K.; KRAUS, S.; YADAV, V. S.; NARKHEDE, B. E. To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126023, 2021.

LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. **New York: Woodworth**, 1932. v. 22.

LIU, Ye *et al.* From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 6, p. 4322-4334, 2020.

MAHROOF, K.; OMAR, A.; RANA, N. P.; SIVARAJAH, U.; WEERAKKODY, V. Drone as a Service (DaaS) in promoting cleaner agricultural production and Circular Economy for ethical Sustainable Supply Chain development. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125522, 2021.

MARIATTI, Francesco *et al.* Process intensification technologies for the recovery of valuable compounds from cocoa by-products. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 68, p. 102601, 2021.

MERIDA, C. *et al.* Desafios e perspectivas para a sustentabilidade do agronegócio brasileiro no cenário pós-pandêmico. **Cadernos de Direito Actual**, Santiago, n. 16, p. 277-295, 2021. Disponível em: <https://www.cadernosdedereitoactual.es/ojs/index.php/cadernos/article/view/734>. Acesso em: 13 ago. 2023.

MITCHELL, M.L.; JOLLEY M. Research design explained. **USA: Nelson Education**, 2012.

MOLIN, Jose Paulo et al. Agricultura de precisão e as contribuições digitais para a gestão localizada das lavouras. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 51, p. e20207720, 2021.

MUKHERJEE, A. A.; SINGH, R. K.; MISHRA, R.; BAG, S. Application of blockchain technology for sustainability development in agricultural supply chain: justification framework. **Operations Management Research**, p. 1-16, 2021.

OBSERVATÓRIO DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA. Comércio exterior brasileiro. Brasil, 2023. Disponível em: <https://observatorio.agropecuaria.inmet.gov.br/paineis/ComercioExterior/comercioExteriorBrasileiro/?lang=pt-BR>. Acesso em: 05 ago. 2024.

OKOLI, C.; PAWLOWSKI, S. D. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. **Information & management**, [S. l.], v. 42, n. 1, p. 15-29,

2004. Disponível em: <https://snazlan.files.wordpress.com/2015/11/the-delphi-method-as-a-research-tool-an-example-design-considerations-and-applications.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2023.

OLIVEIRA, Ricardo J.; Oliveira, Adriana C.; BENNETT, Ben. Perdas e desperdícios pós-colheita em países desenvolvidos e menos desenvolvidos: oportunidades para melhorar o uso de recursos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 149, n. S1, p. 37-45, 2011.

RIZOS, Vasileios; TUOKKO, Katja; BEHRENS, Arno. The Circular Economy: A review of definitions, processes and impacts. **CEPS Papers**, n. 12440, 2017.

ROSE, David Christian *et al.* Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. **Land use policy**, v. 100, p. 104933, 2021.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. Metodologia de pesquisa. 5. ed. São Paulo: **McGraw-Hill**, 2006.

SANTOS QUEVEDO, D. C.; DIAS DA SILVA, R. Perda e desperdício de alimentos no Brasil: as contribuições do Programa de Aquisição de Alimentos (PAA) para sua redução. GeSec: **Revista de Gestão e Secretariado**, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 6295-6317, 2023. DOI: <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i4.2051>. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/2051>. Acesso em: 11 jun. 2023.

SCHMITZ, A. *et al.* Agricultural policy, agribusiness, and rent-seeking behaviour. **Canada: University of Toronto Press**, 2022.

SCHWAB, Klaus. **The fourth industrial revolution**. Crown Currency, 2017.

SELEIMAN, Mahmoud F. *et al.* Will novel coronavirus (Covid-19) pandemic impact agriculture, food security and animal sectors?. **Bioscience Journal**, v. 36, n. 4, 2020.

SHARMA, R.; SAMAD, T. A.; JABBOUR, C. J. C.; DE QUEIROZ, M. J. Leveraging blockchain technology for circularity in agricultural supply chains: evidence from a fast-growing economy. **Journal of Enterprise Information Management**, 2021.

SILVA, Tiago HH; SEHNEM, Simone. Industry 4.0 and the circular economy: integration opportunities generated by startups. **Logistics**, v. 6, n. 1, p. 14, 2022.

SKOROBOGATOVA, N. Ye. Innovative technologies for organizing a balanced development of the business ecosystem (in the example of agriculture in Ukraine). In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **IOP Publishing**, 2023. p. 012105. *a

SKOROBOGATOVA, Natalia. The agribusiness ecosystem as a way to a balanced recovery of the agrarian economy of Ukraine. **Eastern Journal of European Studies**, v. 14, n. 1, p. 198-226, 2023. *b

SOUZA, S. S. de; SILVA, D. N. Ciência, tecnologia, sociedade e meio ambiente: a interface entre a abordagem CTSA e a Indústria 4.0. In: MÜLLER, J.; TELLES, T. (Org.). Educação no Brasil. 2. ed. **Chapéco: Livrologia**, 2020. p. 45-68. (Coleção Brasil; 02).

SPEARMAN, C. Correlation between arrays in a table of correlations. **Proceedings of the royal society of London**, [S. l.], v. 101, n. 708, p. 94-100, abr. 1922. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/94202?typeAccessWorkflow=login>. Acesso em: 15 jun. 2023.

TUROFF, M.; LINSTONE, H. A. The Delphi method: Techniques and applications. New Jersey: **New Jersey Institute of Technology**, 2002. Disponível em: <https://web.njit.edu/~turoff/pubs/delphibook/index.html>. Acesso em: 11 jun. 2023.

USDA Brazil. Food and Agriculture Import Regulations and Standards, 2022. Disponível em DownloadReportByFileName (usda.gov). Acessado em 25 de maio de 2023.

VARELLA, Walter Augusto. Arquitetura de serviços integrada para promover a economia circular na agricultura 4.0. 2022.

WINKLER, Robert. MeteoMex: open infrastructure for networked environmental monitoring and agriculture 4.0. **Peer J Computer Science**, [S. l.], v. 7, p. e323, 2021. DOI: 10.7717/peerj-cs.343. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33816994/>. Acesso em: 14 jun. 2023.

APÊNDICES

APÊNDICE A – E-MAIL DE CONVITE PARA O PAINEL DE ESPECIALISTAS

Caro Especialista do Agronegócio:

Estimo que esteja bem.

Meu nome é Valquiria Demarchi Arns, e atualmente estou embarcando em uma jornada acadêmica relevante no campo da Engenharia, focando em Tecnologias da Indústria 4.0 e Economia Circular. Neste contexto, venho respeitosamente solicitar sua colaboração para enriquecer minha pesquisa de doutorado.

A pesquisa que estou conduzindo tem como objetivo compreender o cenário atual da adoção de tecnologias habilitadoras e práticas circulares no setor do Agronegócio. Como especialista, sua experiência e conhecimento são de fundamental importância para enriquecer o entendimento desse contexto.

Para isso, gostaria de convidá-lo(a) a responder um formulário que desenvolvemos especificamente para coletar suas percepções e insights sobre esse tema tão relevante. Suas respostas serão tratadas com a máxima confidencialidade e utilizadas estritamente para fins acadêmicos.

Seu valioso conhecimento contribuirá significativamente para a construção de um panorama completo e realista das práticas adotadas no Agronegócio, impulsionando, assim, nosso entendimento sobre como a Indústria 4.0 e a Economia Circular estão moldando esse setor.

O formulário pode ser acessado através do seguinte link:
[\[https://forms.gle/fWmdzR6HrFgfmLTP6\]](https://forms.gle/fWmdzR6HrFgfmLTP6)

Caso tenha alguma dúvida ou necessite de mais informações sobre a pesquisa, por favor, não hesite em entrar em contato comigo através do contato 44998080404. Ficaria extremamente agradecida se pudesse dedicar um pouco do seu tempo para contribuir com seus insights valiosos.

Agradeço antecipadamente pela sua colaboração e comprometimento com a pesquisa acadêmica. Sua participação fará uma diferença significativa na ampliação do nosso conhecimento e no avanço do Agronegócio em direção a práticas mais sustentáveis e eficientes.

Caso tenha demanda de mais informações, seguem em anexo mais dados sobre a pesquisa:

Att.

Valquiria Demarchi Arns

Pesquisadora PPGEP

Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Valquiria.demarchi@outlook.com cel: (44) 998080404

www.uninove.br

APÊNDICE B – QUESTÕES ESTRUTURADAS: AVALIAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0, ECONOMIA CIRCULAR, DESEMPENHO SUSTENTÁVEL E SUSTENTABILIDADE FORTE PARA A PÓS-COLHEITA DO AGRONEGÓCIO, SEUS FORNECEDORES E INSTITUTOS

Dados de data/hora

BLOCO 1 – DADOS DO RESPONDENTE E DA EMPRESA

- 1.1 Por favor, indique o cargo que você ocupa em sua empresa.
- 1.2 Por favor, indique há quantos anos você ocupa esse cargo na empresa.
- 1.3 Por favor, indique qual é o porte da empresa que você trabalha.
- 1.4 Por favor, indique qual setor da cadeia da pós-colheita a sua empresa pertence.

BLOCO 2 – TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

Indique o grau de utilização das tecnologias da indústria 4.0 pela área de pós-colheita onde trabalha.

T-2 - Robôs Autônomos – Os robôs trabalham com os humanos, permitindo a aprendizagem e a tomada de decisão, além de resolver tarefas complexas.

T-3 - Simulação - Realiza ajustes em sistemas complexos por meio de conhecimento, informações e estimativas precisas.

T-4 - Internet das Coisas - Conexão entre rede de objetos físicos, ambientes, veículos e máquinas por meio de dispositivos eletrônicos embarcados.

T-5 - Computação na Nuvem – Os dados são armazenados e compartilhados entre diferentes localidades e sistemas além dos limites dos servidores de uma empresa.

T-6 - Manufatura Aditiva - Processo de fabricação de peças com projeto complexo por meio do uso de impressora 3D.

T-7 - Realidade Aumentada - Os usuários podem acessar e interagir com informações que tenham uma relação espacial direta e virtual com seu ambiente.

T-8 - Sistemas Cibernéticos Físicos - São instalações físicas com sensores, processadores e atuadores incorporados que podem ser controlados ou monitorados por computadores.

T-9 - Sistemas Cibernéticos de Segurança - Visam proteger sistemas e informações de possíveis ameaças e falhas que podem causar transtornos na produção.

T-10 - Inteligência Artificial – Técnicas para aprendizagem de máquinas, redes neurais e outros para dar uma solução mais adequada para os problemas.

BLOCO 3 – PRÁTICAS DA ECONOMIA CIRCULAR NA PRODUÇÃO Indique o grau de utilização das práticas da economia circular para a pós-colheita onde trabalha

CE_1	Regenerar	Regenerar e estruturar o capital natural por meio da mudança de projetos para criação de matéria prima, produtos e serviços circulares. Ex. produção de biocombustíveis, compostagem, biorefinação; através de design regenerativo.
CE_2	Recusar	Através de produtos redundantes, substituindo a função inicial ou oferecer com produto diferente. Ex. utilizar subprodutos ou direcionar para a produção de ração.
CE_3	Compartilhar	Através da maximização de ativos; compartilhando o acesso de produtos, bens e serviços (planejado). Ex. compartilhar logística, equipamentos industriais, equipamentos agrícolas; com economia colaborativa, economia compartilhada de bens e ativos.

CE_4	Recondicionar / Remanufaturar / Renovar	Restaurar um produto. Ex. desenvolver e comercializar subprodutos com os resíduos de grãos, equipamentos entre outros.
CE_5	Otimizar	Através da otimização do sistema, por desempenho/performance. Ex. manter, melhorar ou aumentar a vida útil de produtos, bens e serviços; com design Thinking, lifecycle, design para toda cadeia de suprimentos.
CE_6	Reducir	Reducir consumo de recursos durante fabricação ou uso Ex. Utiliza programa para reduzir/eliminar a geração de resíduos na produção.
CE_7	Reaproveitar / Reutilizar	Utilizar o material ou produto de outra maneira de consumo. Ex. reutilização máxima de materiais na produção.
CE_8	Ciclar	Materiais e produtos permanecerem em ciclos, priorizando loops internos. Ex. criar valor para materiais, componentes e produtos; reutilização de resíduos vegetais, recuperação de materiais
CE_9	Reciclar	Processar os materiais e manter a condição de qualidade. Ex. reciclagem de fibras têxteis para produção de artigos têxteis.
CE_10	Reparar / Manter	Reestabelecer a condição em sua função original. Ex. restaurar o valor dos produtos e embalagens pós-consumo por meio de reparo e manutenção.
CE_11	Reparar / Manter	Novos usos para o produto de forma intensa. Ex. classifica/remanufatura os grãos por defeitos de beneficiamento e armazenagem captados por meio de sistema eficiente prolongar a vida útil do produto.
CE_12	Recuperar / Renovar	Recuperar através da incineração de produto e recuperação por aproveitamento da energia gerada. Ex. queima de resíduos agroindústrias
CE_13	Prolongar	Aumentar a vida útil. Ex. reutilizar materiais ao final de vida útil.
EC_14	Virtualizar:	Deslocar o uso de recursos através de tecnologias virtuais. Ex. substituir infraestrutura e ativos físicos por serviços digitais; oferta de serviços remotos, catálogos virtuais.
CE_15	Trocá	Seleção adequada de recursos, produtos e tecnologias. Ex. eliminar processo de venda, substituindo por um serviço atualizado, substituição de bens antigos e não renováveis por produtos avançados e renováveis.
CE_16	Reposicionar	Uso em novo produto de partes do produto ou de todo o produto. Ex. substituir materiais perigosos para aumentar a participação de recursos renováveis e recicláveis.

APÊNDICE C – QUESTÕES ESTRUTURADAS FECHADAS PARA OS ESPECIALISTAS

Big data e analytics:

1. Uso de Big Data e Analytics através de maior capacidade de analisar e gerenciar grandes volumes de dados de produtos agrícolas, promove a prática de regeneração de produtos.
2. O compartilhamento de informações entre empresas do agronegócio, por meio de Big Data, promove o uso compartilhado de recursos e a adoção de técnicas sustentáveis de manejo integrado.
3. A adoção de Big Data para o processamento e análise de dados agrícolas em tempo real possibilita a otimização de recursos e melhoria de eficiência em beneficiamento e armazenagem de produtos.
4. O uso de Big Data e Analytics através da identificação e mitigação do desperdício ao longo da cadeia do agronegócio, promove a redução do consumo de recursos naturais e descartes de resíduos.
5. O uso de Big Data e Analytics para rastrear e monitorar os resíduos ao longo da cadeia produtiva promove a regeneração e o uso desse recurso, como produtos e embalagens.
6. O uso de Big Data e Analytics para gerenciar grandes volumes de dados para mudar os processos do pós-colheita, promove novas oportunidades para o uso das estruturas, possibilitando a prática de repensar.
7. O uso de Big Data e Analytics para monitorar e avaliar a saúde dos ecossistemas do pós-colheita, analisando indicadores ambientais de consumo de recursos e aplicar estratégias de uso de recursos renováveis promove a prática de recuperação e renovação do agronegócio.
8. O uso de Big Data e Analytics por Player do agronegócio, possibilitam a prática da troca de posição de produtos através de acordos, trocas ou parcerias que promovem a prática de otimização de espaço, para destinação dos grãos, de acordo com a logística do beneficiamento até o processamento/esmagamento.
9. O uso de Big Data e Analytics para analisar dados de mercado e tendências para identificar novas oportunidades de reutilização das estruturas de beneficiamento de grãos, promovem a prática de reposicionar através do uso das estruturas para beneficiar soja, milho, sorgo, de acordo com período e região.
10. O uso de Big data e analytics para identificação de padrões de desperdício e redução do descarte de produtos não conformes promove a prática da recusa de produtos.
11. O uso de Big data e analytics para classificação precisa dos produtos, direcionando os resíduos para outras cadeias produtivas ou processos que possam agregar valor e promover a prática de reaproveitamento, evitando a geração desnecessária de resíduos.
12. O uso de Big data e analytics na manutenção preditiva e proativa, reduz o tempo de inatividade e prolongando a vida útil dos ativos, promove a prática de reparar e manter, evitando descartes prematuros e incentivando a economia de recursos naturais.
13. O uso de Big data e analytics em modelos virtuais para simulação de processos, promove a prática de virtualizar através da gestão de estoques, previsão de demanda e planejamento logístico.

Robôs autônomos:

1. O uso de robôs autônomos promove a prática de redução do consumo de recursos, como água, insumos e energia, durante o processo de produção de equipamentos.
2. O uso de robôs autônomos promove a prática de trocar, ao ser usado para embalar e etiquetar produtos, identificando o tamanho e a forma dos produtos.

3. O uso de robôs autônomos para promover a prática de reposicionamento através do transporte interno de produtos dentro das instalações de armazéns ou centros de distribuição.
4. O uso de robôs autônomos para aplicar precisamente produtos fitossanitários, promove a prática de regeneração, reduzindo a quantidade utilizada e minimizando a contaminação do meio ambiente.
5. O uso de robôs autônomos promove a prática de compartilhar, para o processamento de produtos em centros compartilhados.
6. O uso de robôs autônomos promove a prática de remanufaturar, usado na destinação de resíduos do pós-colheita.
7. O uso de robôs autônomos promove a prática de otimizar na distribuição de produtos após beneficiamento e processamento de insumos.
8. O uso de robôs autônomos promove a prática de ciclar para reutilização e prolongamento da vida útil de embalagens de produtos, mantendo dentro do ciclo.
9. O uso de robôs autônomos para promover a prática de reciclagem de embalagens do pós-colheita, transformando em novo recurso.
10. O uso de robôs autônomos para tratar o resíduo gerado dos produtos de limpeza e beneficiamento de grãos, como nova forma de processo e promover a prática de repensar.
11. O uso de robôs autônomos para classificar produtos com base em características de qualidade e direcionar para recuperação de itens danificados promovendo a prática de recuperar e renovar.
12. O uso de robôs autônomos, na armazenagem de produtos programando algoritmos de visão computacional para identificar e controlar a qualidade promovendo a prática de prolongar a condição de armazenagem.
13. O uso de robôs autônomos para identificação e separação de produtos danificados ou não conformes durante o processo de colheita e beneficiamento, evitando que esses itens sejam incorporados à cadeia de produção, promovem a prática de recusar.
14. O uso de robôs autônomos para o transporte interno de insumos e promoção da prática de reaproveitar e reutilizar.
15. O uso de robôs autônomos para automação de tarefas de manutenção, como a inspeção de equipamentos e a promover a prática de reparar e manter.
16. O uso de robôs autônomos avatares para representar fisicamente os robôs autônomos, permitindo uma supervisão remota mais eficiente das operações promovendo a prática de virtualizar.

Simulação e gêmeos digitais:

1. O uso de simulação e gêmeos digitais para identificar gargalos promove a prática de otimizar recursos e melhorar a eficiência operacional.
2. O uso de Simulação Digital e Gêmeos Digitais em novos modelos que permitem simular cenários de produção, identificando problemas e ações promovem a prática de recusar produtos e processos.
3. O uso de Simulação Digital e Gêmeos Digitais como modelos virtuais que facilitam a otimização do processo de reciclagem de materiais, promovem a prática de recusar, através da melhor seleção e aproveitamento dos resíduos.
4. A criação de ambientes virtuais de treinamento através de Simulação Digital e Gêmeos Digitais com uso de simulações e experimentações, promovem a prática de virtualizar.

5. O uso de Simulação Digital e Gêmeos Digitais para gerar diferentes alternativas de substituição de insumos, reduzindo o consumo de recursos naturais promovem a prática da troca.
6. O uso de Simulação Digital e Gêmeos Digitais para a movimentação de produtos, otimizando o fluxo de materiais, promovem a prática de reposicionar.

Internet das coisas:

1. O uso de IoT junto com sensores e dispositivos conectados coletam dados sobre os produtos, o ar, a temperatura, permitindo uma restauração e renovação mais precisa e eficiente dos recursos naturais promovem a prática de regenerar.
2. O uso de IoT através de sensores inteligentes para detecção precoce de produtos não adequados para consumo, promovem a prática da recusa e reduzindo o desperdício.
3. O uso de IoT para rastreamento em tempo real para monitorar a localização e disponibilidade de produtos, incentivando a colaboração entre diferentes atores da cadeia produtiva promove a prática de compartilhamento de recursos.
4. O uso de IoT na implementação de sistemas de monitoramento e controle de embalagens retornáveis, viabilizando a coleta, higienização e reutilização eficiente promovem a prática de reaproveitar e reutilizar.
5. O uso de IoT no monitoramento em tempo real da qualidade dos produtos armazenados, permite a adoção de medidas corretivas para preservar a integridade e valor comercial promovendo a prática de recuperar e renovar.
6. O uso de IoT através de sensores de monitoramento de condições ambientais em equipamentos e maquinários, facilitando a manutenção preditiva promove a prática de prolongar a vida útil.
7. O uso de IoT para inspeções virtuais de classificação dos produtos promovem a prática de virtualizar.
8. O uso de IoT para monitorar insumos utilizados na produção, com objetivo de substituição promove a prática de trocar.
9. O uso de IoT para rastrear a movimentação de produtos e otimizar o fluxo logístico, promove a prática de reposicionamento de produtos.

Computação em nuvem/blockchain:

1. O uso de computação em nuvem/blockchain para assegurar registros e transparência da cadeia de suprimentos, promovem a prática de reciclar e garantindo a origem e destino dos materiais reciclados.
2. O uso de plataformas virtuais para compartilhamento de recursos como equipamentos e maquinários, reduzindo a ociosidade através da computação em nuvem/blockchain, promovem práticas de virtualizar.
3. O uso de computação em nuvem/blockchain em marketplace virtuais para promover a prática de trocas por meio da comercialização de insumos, por negociação direta entre produtores e reduzindo o desperdício.
4. Uso de computação em nuvem/blockchain em plataformas de gestão logística avançadas, com algoritmos de otimização para reorganizar o transporte de produtos promovem a prática de reposicionar, reduzindo o número de deslocamentos vazios.

Impressão 3D e manufatura aditiva:

1. O uso de impressão 3D e manufatura aditiva através de softwares de modelagem 3D para projetar e simular equipamentos, testando diferentes geometrias, tamanhos e configurações sem gastar recursos em materiais físicos no desenvolvimento de máquinas e equipamentos promovem a prática de virtualizar.
2. O uso de impressão 3D e manufatura aditiva em peças de reposição para equipamentos danificados/desgastados promovem a prática de regenerar.
3. O uso de impressão 3D e manufatura aditiva para customização e reparo de embalagens e recipientes, promovem a prática de prolongar a vida útil.
4. O uso de impressão 3D e manufatura aditiva para produção sob demanda de peças e componentes, permiti o beneficiamento de diferentes produtos e promovem a prática de troca.
5. O uso de impressão 3D e manufatura aditiva na reconfiguração e adaptação de maquinário para novos propósitos e processos promovem a prática de reposicionar.

Realidade virtual e aumentada:

1. O uso de realidade virtual e aumentada para treinamento de classificadores e operadores de forma virtual, reduzindo demanda de equipamentos físicos e consumo de recursos para deslocamento promovem a prática de virtualizar.
2. O uso de realidade virtual e aumentada em ambientes virtuais que simulam processos de regeneração de produtos e resíduos agrícolas promovem a prática de regenerar.
3. O uso de realidade virtual e aumentada para visualização e análise dos processos promovem a prática de otimização de recursos.
4. O uso de realidade virtual e aumentada em modelos virtuais de equipamentos e sistemas, identificando oportunidades de extensão da vida útil desses ativos por meio de manutenções preventivas, ajustes e melhorias contínuas promovem a prática de prolongar.
5. O uso de realidade virtual e aumentada para simular a substituição de materiais não renováveis por alternativas sustentáveis, permitindo a avaliação prévia dos impactos e benefícios dessa troca promovem a prática de prolongar.
6. O uso de realidade virtual e aumentada em protótipos virtuais de novos arranjos de máquinas e equipamentos, identificando oportunidades de reconfiguração e adaptação dos recursos tecnológicos promovem a prática de reposicionar.

Ciber Segurança industrial:

1. O uso de Ciber Segurança Industrial promove a prática da recusa no pós-colheita, através de parcerias com empresas que adotam práticas sustentáveis, aumentando eficiência, sustentabilidade e segurança.
2. O uso de Ciber Segurança industrial promove a prática de compartilhamento seguro de dados via nuvem entre os atores da cadeia, protegendo informações, evitando ataques e permitindo monitoramento de estoques e comercialização em tempo real.
3. O uso da Ciber Segurança industrial nas operações de manutenção de equipamentos, implementando sistemas de monitoramento e diagnóstico remoto promove a prática de otimizar.
4. O uso da Ciber Segurança industrial para monitorar o consumo de recursos como energia elétrica e água, coletando dados, transmitindo de forma segura promove a prática de reduzir o consumo dos recursos naturais e energéticos.
5. O uso da Ciber Segurança industrial através de sistemas de rastreamento e monitoramento de equipamentos e maquinários, coletando dados sobre o desempenho

- e a vida útil, permite a manutenção identificar peças e componentes promovendo a prática de reaproveitar ou reutilizar.
6. O uso da Ciber Segurança industrial para a classificação de resíduos, identificando e separando os materiais recicláveis dos resíduos não aproveitáveis, promovem a prática de reciclagem dos resíduos.
 7. O uso da Ciber Segurança industrial para monitorar a qualidade dos grãos, condições de armazenamento e equipamentos em tempo real, usando análise de dados para decisões estratégicas e otimização de recursos promove a prática de repensar.
 8. O uso da Ciber Segurança industrial para rastreamento, autenticação de grãos desde colheita até consumidor final, garantindo origem, qualidade e incentivando consumo sustentável promove a prática de troca de posição.
 9. O uso da Ciber Segurança industrial promove a prática de redirecionar produtos e insumos via IoT e análise de dados, evitando pragas e garantindo qualidade.
 10. O uso de Ciber Segurança industrial para proteger e manter sistemas automatizados utilizados para promove a prática de regenerar/restaurar resíduos e compostagem.
 11. O uso de Ciber Segurança industrial em equipamentos - garantindo a proteção dos dados sensíveis e a integridade dos processos de restauração, promove a prática de recondicionar, remanufaturar e renovar.
 12. O uso de Ciber Segurança industrial para ciclar materiais e insumos, assegurar a proteção dos dados de rastreabilidade, otimizando o fluxo circular e reduzindo riscos de violações promove a prática de ciclar.
 13. O uso de Ciber Segurança industrial promove a prática de reparar/manter equipamentos de falhas, otimizando vida útil dos dispositivos e reduzindo descarte prematuro.
 14. O uso de Ciber Segurança industrial para reabilitação de dispositivos danificados/obsoletos, prolongando vida útil promove a prática de recuperar e renovar.

Integração de sistemas e interoperabilidade:

1. O uso da integração de sistemas e interoperabilidade através de plataformas digitais colaborativa por diferentes agentes da cadeia, promove a prática de compartilhar informações em tempo real sobre a disponibilidade de produtos, demanda, logística e estoques.
2. O uso da integração de sistemas e interoperabilidade na gestão de resíduos de forma conectada, rastreia origem e promove a prática de reciclagem, como biomassa para energia e de embalagens.
3. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade na adoção de sistemas e interoperabilidade promove a prática de recusa de materiais ou insumos que não estejam em conformidade.
4. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade para facilitar o fluxo de informações entre as etapas do processo, viabilizando a identificação e seleção adequada de produtos promove a prática de recondicionar, remanufaturar ou renovar.
5. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade na coleta e análise de dados em tempo real promove a otimização e de recursos e desperdício.
6. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade para compartilhar informações de disponibilidade de produtos ou materiais promove a prática de reaproveitar ou reutilizar.
7. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade para rastrear e monitorar em tempo real os produtos, promove a prática de ciclar, nos quais os produtos são reintegrados em ciclos de uso.
8. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade para identificar falhas continua promove a prática de reparar e manter equipamentos.

9. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade para coleta de dados práticos e análise profunda, promove a prática de repensar os processos e melhorias.
10. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade promove a prática de recuperação e renovação de materiais, através de informações precisas das condições, histórico e possíveis tratamentos para prolongar sua utilidade.
11. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade promove a prática de troca de informações entre diferentes agentes, viabilizando o uso de recursos, como maquinários, embalagens ou transporte disponíveis.
12. O uso de Integração de Sistemas e Interoperabilidade para visualização das necessidades e disponibilidades de recursos, promove a prática de reposicionando de ativos, maximizando a utilização, em especial de espaço de armazenagem.

Inteligência artificial e aprendizado de máquina:

1. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina utilizando técnicas de análise de dados, para monitorar o desempenho dos equipamentos ao longo do tempo, identificando padrões e anomalias nos dados que indicam a necessidade de reparos ou manutenções preventivas, promovem a prática de otimização de paradas e desperdício.
2. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina promovem a prática de reduzir desperdício através do monitoramento, análise e otimização da qualidade dos produtos, reduzindo perdas e aprimorando distribuição.
3. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina através de sistemas de triagem automatizada, equipados com algoritmos de IA, para separar produtos e resíduos agrícolas promovem a prática de reciclagem.
4. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina para gerenciamento de processo e resíduos agrícolas, identificando padrões e tendências nos resíduos gerados após a colheita, permitindo análise precisa dos descartes, promovem a prática de repensar soluções: biocombustíveis, alimentação animal e geração de fertilizantes naturais.
5. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina através de algoritmos para analisar dados relacionados a ofertas e demanda de produtos e prever tendências de mercado para negociação, promovem a prática de reposicionar.
6. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina para criar sistemas de monitoramento que identificam e direcionam automaticamente produtos promovem a prática de regeneração.
7. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina para identificação automática de produtos que não atendem aos padrões de qualidade ou segurança, promovem a prática de recusa.
8. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina em análise de dados em tempo real, promovem a prática de compartilhamento de dados e conhecimentos entre diferentes atores, favorecendo a colaboração e soluções conjuntas.
9. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina em análise de dados e identificação de padrões, com seleção adequada de produtos promovem a prática de recondicionar, remanufaturar ou renovar.
10. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina para monitorar e otimizar o fluxo de recursos e produtos em ciclos fechados, permite a reintegração de materiais nos processos e promovem a prática de ciclar.
11. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina para prever e detectar falhas em equipamentos para execução de manutenções preditivas, promovem práticas de reparar e manter, para prolongar a vida útil dos ativos.

12. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina promovem a prática de recuperação/renovação de peças e equipamentos, direcionando para os processos adequados, evitando o descarte prematuro.
13. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina para intervir no uso dos recursos, promovem a prática de prolongar a vida útil dos produtos.
14. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina promovem a prática de virtualizar simulando diferentes cenários de produção, permitindo uma análise prévia de impactos ambientais e identificação de oportunidades de melhorias.
15. O uso de Inteligência artificial e aprendizado de máquina promovem a prática de troca eficiente de recursos entre diferentes atores da cadeia, reduzindo desperdícios.