

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Química - Campus Araraquara

William Shinji Yamashita

**EXPLORANDO A CONEXÃO ENTRE A ECONOMIA CIRCULAR E A INDÚSTRIA
4.0: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

ARARAQUARA

2023

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Química - Campus Araraquara

William Shinji Yamashita

EXPLORANDO A CONEXÃO ENTRE A ECONOMIA CIRCULAR E A INDÚSTRIA
4.0: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho” como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves
Vieira

ARARAQUARA

2023

Y19e

Yamashita, William Shinji

Explorando a conexão entre a economia circular e a indústria 4.0 : uma revisão sistemática da literatura / William Shinji Yamashita. -- Araraquara, 2023

78 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Química, Araraquara

Orientador: Gustavo Nakamura Alves Vieira

1. Economia circular. 2. Indústria de tecnologia de ponta. 3. Revisão. 4. Sustentabilidade. 5. Tecnologia. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Química, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

William Shinji Yamashita

Explorando a conexão entre a Economia Circular e a Indústria 4.0: uma revisão sistemática da literatura

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Araraquara, 13 de dezembro de 2023

Banca examinadora

Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira

Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho

Prof. Dr. Ossamu Hojo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por seu apoio incondicional ao longo desta jornada acadêmica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira pelo apoio e pela paciência ao longo deste trabalho.

Aos amigos, compartilho meu reconhecimento pela camaradagem e pelos momentos enriquecedores compartilhados ao longo desses anos.

A todos os professores, pelo conhecimento transmitido e pelo papel fundamental no meu crescimento acadêmico.

RESUMO

O presente trabalho investigou a convergência entre dois temas pertinentes na contemporaneidade: a Economia Circular e a Indústria 4.0, também analisando os benefícios advindos de sua implementação conjunta. Isso foi realizado por meio de uma revisão sistemática da literatura, juntamente com uma análise bibliométrica e uma análise qualitativa. Os resultados demonstraram que as tecnologias da Indústria 4.0 incentivam a transição para uma Economia Circular. A análise bibliométrica revelou um aumento notável no interesse acadêmico pela integração desses conceitos, destacando o crescente escopo de pesquisas sobre a aplicação das tecnologias 4.0 para práticas sustentáveis alinhadas à Economia Circular. Tecnologias como Internet das Coisas, computação em Nuvem e Big Data emergiram como centrais, convergindo com Simulação, Manufatura Aditiva e Blockchain. Essa abordagem integrada ressalta a sinergia entre inovação tecnológica e princípios circulares, apontando para um caminho promissor na construção de sistemas mais eficientes e ecologicamente conscientes. Na transição para uma Economia Circular na era da Quarta Revolução Industrial enfrentamos diversas barreiras, evidenciando a complexidade do processo, que exige uma nova mentalidade e a participação ativa de governos, empresas e da sociedade civil para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades apresentadas. A implementação efetiva de uma Economia Circular alinhada à Indústria 4.0 requer um comprometimento conjunto, destacando a importância da colaboração público-privada para impulsionar a transição para práticas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Economia circular. Indústria de tecnologia de ponta. Revisão. Sustentabilidade. Tecnologia.

ABSTRACT

The present study investigated the convergence between two relevant themes in contemporaneity: Circular Economy and Industry 4.0, also analyzing the benefits arising from their joint implementation. This was carried out through a systematic literature review, along with bibliometric analysis and qualitative analysis. The results demonstrated that Industry 4.0 technologies encourage the transition to a Circular Economy. Bibliometric analysis revealed a notable increase in academic interest in the integration of these concepts, highlighting the growing scope of research on the application of Industry 4.0 technologies for sustainable practices aligned with the Circular Economy. Technologies such as the Internet of Things, Cloud Computing, and Big Data emerged as central, converging with Simulation, Additive Manufacturing, and Blockchain. This integrated approach emphasizes the synergy between technological innovation and circular principles, pointing towards a promising path in building more efficient and ecologically conscious systems. In the transition to a Circular Economy in the era of the Fourth Industrial Revolution, we face various barriers, highlighting the complexity of the process that requires a new mindset and active participation from governments, businesses, and civil society to address challenges and seize opportunities. The effective implementation of a Circular Economy aligned with Industry 4.0 requires joint commitment, emphasizing the importance of public-private collaboration to drive the transition towards more sustainable practices.

Keywords: Circular economy. High technology industries. Review. Sustainability. Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Um modelo de Economia Circular e seus potenciais benefícios	14
Figura 2 - Diagrama dos ciclos biológico e técnico da Economia Circular	18
Figura 3 - Os 10 Rs da Economia Circular.....	24
Figura 4 - Estágios das Revoluções Industriais	26
Figura 5 - Os nove pilares da Indústria 4.0	28
Figura 6 - Arquitetura 5C para construção de Sistemas Ciber físicos.....	29
Figura 7 - Delineamento do trabalho	37
Figura 8 – Formação do portfólio de artigos	38
Figura 9 - Artigos publicados por ano de publicação	44
Figura 10 - Artigos por área de conhecimento.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	ECONOMIA CIRCULAR.....	13
2.1.1	Origem do termo	14
2.1.2	Fundamentos	15
2.1.2.1	Eliminar resíduos e poluição.....	17
2.1.2.2	Circular produtos e materiais	18
2.1.2.3	Regenerar a natureza.....	19
2.1.3	Modelos de Negócios	20
2.1.3.1	Orientado para Produtos	20
2.1.3.2	Orientado para Uso	21
2.1.3.3	Orientado para Resultados	22
2.1.4	Transição a Economia Circular	23
2.2	INDÚSTRIA 4.0.....	25
2.2.1	Breve Histórico	25
2.2.2	Conceitos	27
2.2.3	Pilares	27
2.2.3.1	Sistemas Ciber físicos	28
2.2.3.2	Integração dos Sistemas.....	31
2.2.3.3	Internet das Coisas	31
2.2.3.4	Big Data	32
2.2.3.5	Nuvem.....	32
2.2.3.6	Robôs Autônomos.....	33
2.2.3.7	Simulação.....	34
2.2.3.8	Realidade Aumentada	34
2.2.3.9	Manufatura Aditiva.....	35
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	CLASSIFICAÇÃO	36
3.2	DELINAMENTO DO TRABALHO	37
3.2.1	Procedimentos Técnicos	38
3.2.1.1	Pesquisa preliminar nas bases de dados.....	38
3.2.1.2	Definição das palavras chave, base de dados e delimitação temporal.....	39

3.2.1.3	Pesquisa definitiva nas bases de dados	39
3.2.1.4	Procedimentos de filtragem	39
3.2.1.5	Identificação do Fator de Impacto, ano de publicação e número de citações:.....	40
3.2.1.6	Aplicação do InOrdinatio.....	40
3.2.1.7	Localização, leitura e análise sistemática dos artigos	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	44
4.1.1	Quantidade de publicações ao longo do tempo	44
4.1.2	Quantidade de publicações por país	45
4.1.3	Áreas de conhecimento mais predominantes.....	46
4.1.4	Palavras chaves mais utilizadas	47
4.2	ANÁLISE QUALITATIVA.....	49
4.2.1	Tecnologias da Indústria 4.0 que impulsionam a Economia Circular	53
4.2.1.1	Internet das Coisas, Nuvem e Big Data	54
4.2.1.2	Blockchain	55
4.2.1.3	Manufatura Aditiva.....	56
4.2.1.4	Simulação.....	57
4.2.2	Rumo a uma Economia Circular alinhada à Indústria 4.0	58
4.2.3	Estudo de casos.....	63
4.2.3.1	Alpha.....	64
4.2.3.2	Bumble Bee Foods.....	65
4.2.3.3	Tesla, Inc.....	66
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Geissdoerfer *et al.* (2017) definem a Economia Circular como um sistema regenerativo no qual a entrada de recursos, desperdício, emissões e vazamentos de energia são minimizados através da desaceleração, fechamento e estreitamento dos ciclos de material e energia. O conceito de Economia Circular desperta grande interesse tanto entre acadêmicos quanto profissionais, uma vez que é considerado uma aplicação prática para as empresas concretizarem a amplamente debatida ideia de desenvolvimento sustentável (Kirchherr *et al.*, 2017).

A Indústria 4.0 é uma filosofia de fabricação que envolve sistemas de automação modernos com um alto grau de autonomia, trocas de dados flexíveis e eficazes que promovem a implementação de tecnologias de produção de próxima geração, inovação no design e uma produção mais personalizada e ágil, adaptada a produtos específicos. Seu objetivo é revolucionar a fabricação convencional, transformando-a em uma manufatura digital, na qual máquinas e produtos se tornam inteligentes e interconectados, resultando em maior eficiência e produtividade (Oztemel; Gursev, 2018).

De acordo com Rosa *et al.* (2019) a Indústria 4.0 e a Economia Circular são, inegavelmente, dois dos temas mais discutidos nas últimas décadas. Ambos gradualmente, despertaram o interesse de legisladores, profissionais e acadêmicos ao redor do mundo e, mesmo que geralmente tenham sido considerados como campos de pesquisa independentes, existem casos que demonstram interseções entre esses assuntos.

Dada a relevância dos temas, é fundamental adquirir uma compreensão mais aprofundada do que está sendo pesquisado e divulgado acerca dos mesmos. Uma revisão sistemática de literatura, conforme definida por Sampaio (2007), é um método de pesquisa que possibilita a integração de conhecimentos previamente obtidos sobre um tema específico. No contexto deste estudo, o uso dessa abordagem visa proporcionar uma compreensão abrangente dos impactos associados a Economia Circular e a Indústria 4.0, identificando as tecnologias e recursos da Indústria 4.0 que contribuem para o avanço e implementação da Economia Circular.

O objetivo deste trabalho é explorar os efeitos e benefícios provenientes da transição a uma Economia Circular alinhado à Indústria 4.0 por meio da realização uma Revisão Sistemática da Literatura que incorpora tanto uma análise bibliométrica quanto uma análise qualitativa. Os objetivos específicos a serem abordados serão:

- Realizar uma análise bibliométrica de modo a identificar as principais áreas de conhecimento, países e palavras chave associados ao tema;

- Realizar uma análise qualitativa para identificar na literatura as correlações entre a Economia Circular e Indústria 4.0;
- Identificar tecnologias da Indústria 4.0 que promovem o avanço da Economia Circular;
- Analisar os impactos nas organizações advindos da adoção da Economia Circular alinhada à Indústria 4.0;
- Apresentar casos de implementação bem-sucedidas de características da Economia Circular e tecnologias da Indústria 4.0

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse trabalho se fundamenta em dois conceitos principais, a Economia Circular e a Indústria 4.0. Nesta seção essas ideias são introduzidas através da apresentação de um breve histórico, das suas definições e de seus principais aspectos e componentes.

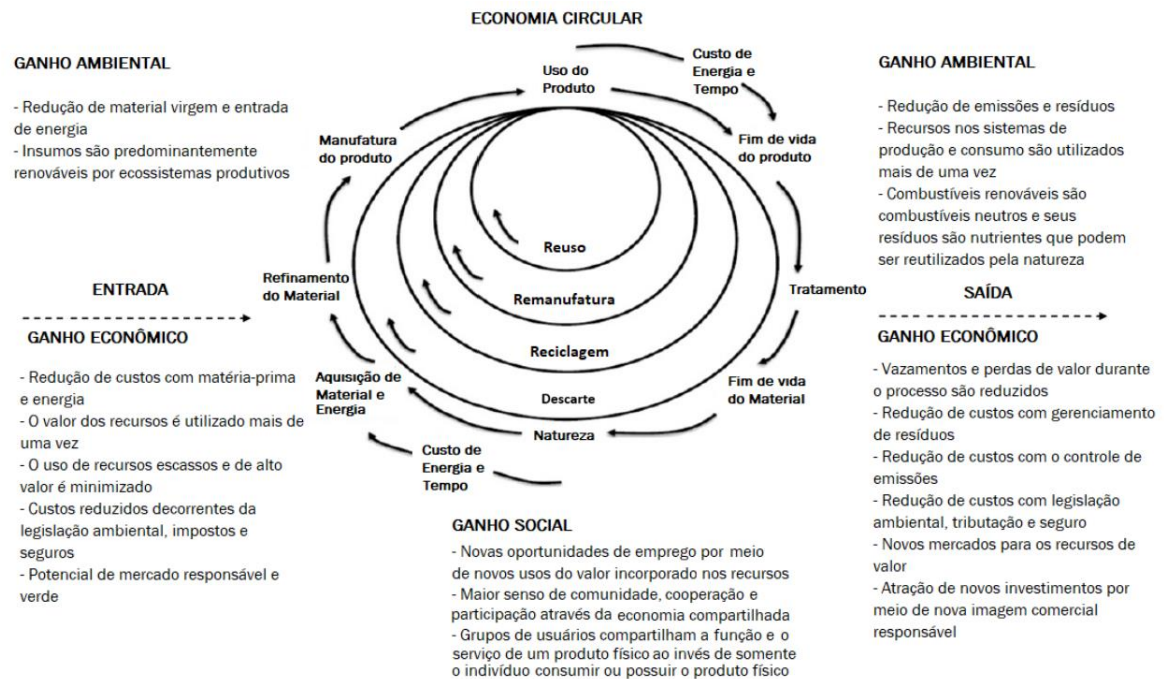
2.1 ECONOMIA CIRCULAR

Segundo Murray, Skene e Haynes (2015) a indústria tem há muito tempo clamado por orientações na implementação de estratégias para o desenvolvimento sustentável. A Economia Circular representa a mais recente tentativa de conceituar a integração da atividade econômica e do bem-estar ambiental de uma forma sustentável.

De acordo com Korhonen; Honkasalo; Seppälä (2018) a concepção atual da Economia é apresentada na Figura 1. As camadas internas que incluem a reutilização, remanufatura e recondição dos produtos, demandam menos recursos e energia, além de serem mais econômicas do que a reciclagem convencional de materiais como matérias-primas de baixa qualidade. O objetivo é maximizar o tempo que os recursos permanecem nas camadas internas. Os materiais devem primeiro ser recuperados para reutilização, recondição e reparo, e apenas posteriormente para remanufatura e utilização de matérias-primas, que tem sido o foco principal na reciclagem tradicional. A queima de materiais para produção de energia deve ser a penúltima opção, enquanto o descarte em aterros sanitários é a última opção. Dessa forma, a cadeia de valor do produto e seu ciclo de vida mantêm o maior valor e qualidade possíveis pelo maior tempo possível.

Nessa situação idealizada da Economia Circular os fluxos físicos de materiais e energia reduziriam as entradas de materiais virgens no sistema, bem como os resíduos e emissões resultantes do sistema. Isso levaria a diversos ganhos econômicos, ambientais e sociais apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Um modelo de Economia Circular e seus potenciais benefícios



Fonte: Adaptado de ENGEMA (2021)

2.1.1 Origem do termo

A ideia dos ciclos de materiais existe desde o início da industrialização, desde essa época se defendia que sua implementação levaria a redução de impactos ambientais negativos e o estímulo a oportunidades de negócios (Korhonen; Honkasalo; Seppälä, 2018). No entanto, o modelo linear de produção foi o predominante e tem causado sérios danos ambientais, ameaçando a estabilidade econômica e a integridade dos ecossistemas naturais essenciais para a sobrevivência da humanidade (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016). Levando isso em consideração a Economia Circular foi concebida destacando a necessidade de redesenhar o tradicional modelo de produção e consumo “pegar-produzir-descartar”. A transição para uma sociedade mais circular busca separar o crescimento econômico da depleção de recursos naturais e da degradação ambiental (Prieto-Sandoval; Jaca; Ormazabal, 2018).

De acordo com Murray, Skene e Haynes (2015) a origem do termo Economia Circular é debatida e atribuída a diversos autores. Em 1848, Hofman afirmou a ideia de que em uma fábrica química ideal, não há desperdício, apenas produtos. Greyson afirma que Kenneth Boulding, em 1966, foi o criador do termo, ao enfatizar a necessidade de a humanidade encontrar seu lugar dentro de um sistema ecológico cíclico. Liu *et al.* em 2009 argumentaram que a concepção da Economia Circular teve origem na China, citando um artigo não

referenciado de Zhu. Stahel e Reday-Mulvey, em 1976, foram os primeiros a se referirem a uma economia de ciclo fechado, influenciando-se nas ideias de Boulding em 1966. Robèrt, em 1991, destacou a importância de processar recursos em ciclos para evitar problemas ambientais e econômicos (Murray; Skene; Haynes, 2015).

No entanto diversos escritores como Andersen (2007), Su *et al.* (2013), Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016) e Geissdoerfer *et al.* (2017) atribuem a introdução do conceito aos autores Pearce e Turner (1989) e, portanto, aqui será explicado sua ideia central. Segundo eles a economia tradicional não incorporava a reciclagem como parte fundamental, tratando o meio ambiente como um depósito de resíduos. Portanto, argumentaram que, de acordo com a primeira lei da termodinâmica, é possível e essencial transformar o sistema econômico de um ciclo aberto em um sistema fechado, ao considerar a conexão entre o uso de recursos e a produção de resíduos. Em resumo, diante dos desafios ambientais e da escassez de recursos, eles advogaram por uma abordagem que encara a Terra como um sistema econômico fechado, onde economia e meio ambiente estão intrinsecamente ligados em um ciclo contínuo (Su *et al.*, 2013).

Com isso vemos que o conceito de Economia Circular tem sido associado a uma variedade de significados e autores ao longo dos anos, no entanto a ideia central compartilhada por todos é a de um sistema cíclico de circuito fechado.

Em relação a escolha do termo Economia Circular Murray, Skene e Haynes (2015) afirmam que a expressão se popularizou por ter um significado tanto linguístico quanto descritivo. Linguisticamente, é o antônimo de economia linear, que consiste em converter recursos naturais em resíduos por meio da produção, resultando na deterioração do ambiente de duas maneiras: pela retirada de capital natural do meio ambiente e pela redução do valor do capital natural devido à poluição causada pelos resíduos. O termo economia linear foi popularizado por escritores que abordaram a Economia Circular e seus conceitos relacionados, estabelecendo assim a origem do termo de forma deliberada para promover a Economia Circular. Além disso, a palavra Circular tem um segundo significado, inferido, descritivo relacionado ao conceito de ciclos.

2.1.2 Fundamentos

Um dos conceitos mais cruciais na Economia Circular é a adoção de uma abordagem sistêmica abrangente que engloba todas as atividades, desde a extração de matérias-primas até o destino final dos produtos, componentes e materiais. Essa abordagem transcende o mero foco

no processo de produção, abraçando uma perspectiva holística que considera o sistema como um todo (Blomsma; Brennan, 2017). Essa perspectiva integrada traz consigo diversos benefícios:

- **Relação entre lucro e sustentabilidade:** a Economia Circular busca estabelecer uma relação direta entre o ganho econômico e a sustentabilidade ambiental. Em vez de considerar esses dois elementos separadamente, a abordagem circular procura integrá-los, incentivando práticas econômicas que sejam sustentáveis a longo prazo (Korhonen; Honkasalo; Seppälä, 2018).
- **Soluções interconectadas:** em contraste com soluções isoladas, a Economia Circular busca a implementação de soluções interconectadas que abranjam todas as fases dos processos econômicos. Isso significa que não se deve mais planejar de forma isolada, mas sim considerar como todas as etapas se relacionam e se influenciam mutuamente (Blomsma; Brennan, 2017).
- **Agregação de valor em toda a cadeia:** a Economia Circular promove a criação de valor em todas as partes da cadeia produtiva. Isso envolve a busca por novas formas de conexões e modelos de negócios que beneficiem não apenas uma parte, mas todas as partes envolvidas no ciclo, incluindo fabricantes, consumidores, e o meio ambiente (Merli *et al.*, 2018).

A ideia central da Economia Circular é transformar a maneira como produzimos e consumimos, com o objetivo de:

- **Conceber um novo modelo de desenvolvimento econômico ou uma nova forma de economia que surge das práticas de “reduzir, reusar e reciclar” (os 3 Rs) (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016).**
- **Oferecer uma nova perspectiva política e econômica buscando mudar o modelo de crescimento baseado no uso crescente de recursos e na geração de poluentes (Korhonen; Honkasalo; Seppälä, 2018).**
- **Prolongar a vida útil dos produtos, componentes e materiais, visando maximizar sua utilidade e valor ao longo do tempo (EMF, 2023).**
- **Redefinir o conceito de crescimento, priorizando benefícios não apenas econômicos e comerciais, mas também vantagens para o meio ambiente e toda a sociedade (Geissdoerfer, 2017).**

- Construir capital econômico, capital humano (através do desenvolvimento de novas mentalidades e conhecimentos) e preservar os recursos naturais (capital natural) (Fernandes, 2023, apud Stahel, 2016).

De acordo com a Ellen MacArthur Foundation, uma renomada organização não governamental dedicada a impulsionar a transição para a Economia Circular (Dantas *et al.*, 2021), a Economia Circular possui três princípios centrais.

2.1.2.1 Eliminar resíduos e poluição

Durante muito tempo, as organizações estiveram concentradas em aprimorar a eficiência de seus processos, com o objetivo de reduzir danos ambientais. No entanto, essa abordagem de “fazer menos mal” equivale a continuar causando impactos negativos, ainda que em menor escala, sem resolver efetivamente os desafios ambientais que enfrentamos devido à aplicação insustentável do sistema nas últimas décadas. A solução reside em uma mudança de foco para “fazer bem” (eficácia) e na construção de sistemas resilientes que atendam verdadeiramente às necessidades das comunidades e contribuam para seu progresso. Fazer bem implica em gerar valor para todas as partes envolvidas, incluindo organizações, comunidades, seres vivos e o meio ambiente, tornando-se essencial para uma abordagem sustentável e responsável no cenário atual (Teixeira, 2021).

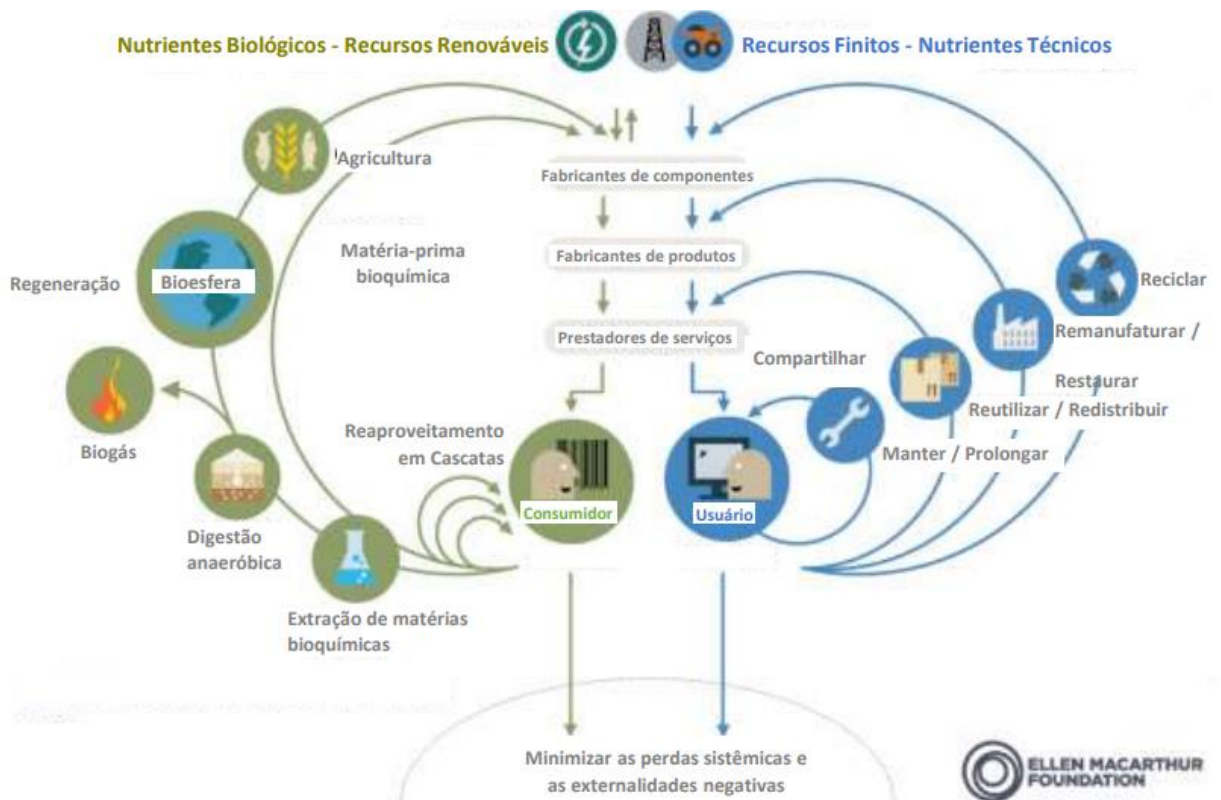
O problema fundamental começa com o design dos produtos, muitos dos quais são concebidos para serem descartáveis. O desperdício é, na verdade, uma consequência das escolhas de design e não uma inevitabilidade. É possível mudar essa mentalidade ao tratar os resíduos como uma falha de projeto, estabelecendo como especificação que os materiais retornem à economia após o fim de sua vida útil (EMF, 2023). Selecionar um material que permita a reintegração dos seus nutrientes naturais ao ecossistema ou, em último caso, que possa ser reciclado de maneira eficiente, desempenha um papel fundamental. Essa escolha contribui para a fabricação de produtos de longa duração, reduzindo a necessidade de aquisição de novos recursos e minimizando potenciais impactos negativos no ecossistema. Isso, por sua vez, ajuda a prevenir a exaustão do capital natural devido à exploração excessiva (Murray; Skene; Haynes, 2015).

2.1.2.2 Circular produtos e materiais

Há diversas formas de manter produtos e materiais em circulação. Isso é feito por meio de dois fluxos principais: o ciclo biológico, que devolve nutrientes ao ecossistema, e o ciclo técnico, que reutilizam os chamados nutrientes técnicos (EMF, 2023). Esses ciclos possibilitam a reutilização de materiais e a retroalimentação do sistema, reduzindo a necessidade de novos recursos e equilibrando as demandas do ecossistema natural (Korhonen; Honkasalo; Seppälä, 2018).

A Figura 2 abaixo representa os ciclos de nutrientes técnicos e biológicos. É fundamental entender que, como seres humanos, desempenhamos o papel de consumidores nos ciclos biológicos e de usuários nos ciclos técnicos. Isso significa que os produtos biológicos devem ser ecologicamente seguros (não tóxicos), enquanto os produtos tecnológicos devem ter sua vida útil prolongada o máximo possível.

Figura 2 - Diagrama dos ciclos biológico e técnico da Economia Circular



Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2019)

No ciclo biológico, é possível reintegrar na economia materiais biodegradáveis que não são passíveis de reutilização, como certos resíduos alimentares. Através da compostagem ou da digestão anaeróbica desses materiais orgânicos, é viável recuperar nutrientes valiosos que podem ser empregados para regenerar o solo, permitindo, assim, o cultivo de novos alimentos

e a produção de materiais renováveis, como algodão e madeira, com um impacto ambiental reduzido (EMF, 2023).

No ciclo técnico, são propostos métodos com o objetivo principal de restaurar recursos finitos. Isso envolve a implementação de diversas soluções para prolongar a vida útil dos produtos e componentes. Em primeiro lugar, é crucial promover alternativas que facilitem a manutenção e o reparo dos produtos, garantindo que eles sejam utilizados por mais tempo. Além disso, é essencial priorizar soluções que incentivem o compartilhamento de recursos, maximizando sua utilidade. Quando um usuário não deseja mais um produto específico, deve haver canais que facilitem sua coleta, manutenção ou redistribuição. Quando um produto se torna obsoleto ou não pode mais ser reparado, a abordagem ideal é desmontá-lo e aproveitar seus componentes na fabricação de novos produtos. Somente quando nenhuma dessas alternativas for viável, os recursos devem ser direcionados para processos de reciclagem adequados (Teixeira, 2021).

Um ponto importante ressaltado pela Ellen Macarthur Foundation (2023) é que certos itens, como vestuários de algodão ou mobiliários de madeira, possuem a versatilidade de transitar tanto pelo ciclo técnico quanto pelo biológico. Eles podem ser preservados, reutilizados, submetidos a reparos e reciclados, além de poderem ser reintegrados ao ciclo biológico de onde se originaram.

2.1.2.3 Regenerar a natureza

O atual sistema de consumo baseado na extração de recursos da Terra, produção de produtos e descarte subsequente como resíduos é insustentável devido à finitude dos recursos do planeta. É crucial que as taxas de extração dos fluxos no sistema estejam alinhadas com os limites naturais. Quanto aos recursos renováveis, é imperativo manter o consumo em níveis onde a taxa de exploração não deve ultrapassar a taxa de regeneração. Em relação aos recursos limitados, é essencial priorizar a redução do consumo mantendo a taxa de exploração abaixo da taxa de criação de recursos renováveis alternativos. Além disso, é importante notar que recursos não renováveis requerem investimento de capital humano para sua transformação e reintegração no sistema econômico, ressaltando a necessidade de diminuir, e se possível, eliminar o seu uso (ENGEMA, 2021).

A Ellen Macarthur Foundation (2023) afirma que ao realizar a transição de uma economia linear para uma circular, ocorre a mudança da extração para a regeneração. Isso implica em deixar de degradar continuamente a natureza e começar a construir capital natural.

As práticas agrícolas são adaptadas para permitir que a natureza regenere o solo e aumente a biodiversidade, além de devolver materiais biológicos à terra. Hoje em dia, a maioria desses materiais são perdidos após o uso, e a terra usada para cultivá-los sofre com a exaustão de seus nutrientes. Durante a transição para um modelo regenerativo, passamos a emular os sistemas naturais, onde não há desperdício. Ao longo dos anos, os sistemas naturais se aprimoraram na arte da regeneração, enquanto o conceito de desperdício é uma invenção humana recente.

Ao priorizar a retenção de produtos e materiais em uso, podemos reduzir a necessidade de explorar recursos naturais, como os provenientes de minas. Conforme a atividade econômica se afasta gradualmente da extração de recursos, favorecendo a manutenção dos materiais em circulação após o uso, podemos liberar progressivamente mais terras para que a natureza se regenere. Em uma economia circular, as áreas antes dedicadas à obtenção de materiais se concentram no cultivo sustentável de recursos renováveis, deixando de lado a exploração de recursos finitos. Isso possibilita a obtenção de materiais que permanecerão em constante circulação por períodos cada vez mais longos (EMF, 2023).

2.1.3 Modelos de Negócios

Para estimular as empresas a adotarem a Economia Circular, a literatura anterior vislumbra uma transição das vendas de produtos para a oferta de serviços. Nesse sentido, as empresas devem converter não apenas sua proposição de valor, mas todo o seu Modelo de Negócios, movendo-se assim em direção a um modelo orientado para serviços, que é um excelente meio de aprimorar a competitividade e promover a sustentabilidade simultaneamente (Bressanelli *et al.*, 2018).

Tukker (2004) propõe três categorias de Modelo de Negócios: orientado para produtos, orientado para uso e orientado para resultados. A classificação continua sendo o ponto de referência mais amplamente aceito (Bressanelli *et al.*, 2018), sendo extensivamente utilizado na literatura contando com mais de 1400 citações (Wiley, 2023). Abaixo, a classificação de Tukker (2004) é introduzida:

2.1.3.1 Orientado para Produtos

O principal objetivo é fornecer um valor tangível ao cliente. O valor é considerado um atributo incorporado ao produto. Os direitos de propriedade sobre o produto são transferidos para o cliente, enquanto a empresa pode vender uma combinação de produtos padrões e serviços

industriais. O objetivo desses serviços é melhorar ou restaurar a funcionalidade do produto, como por meio de manutenção e reparo (serviços básicos de campo e inspeção). Como o serviço é considerado um negócio não central, a empresa pode definir uma rede de fornecedores de serviços terceirizados.

Além disso, a troca de informações é limitada e geralmente relacionada a aspectos técnicos e operacionais. Nessa categoria de modelo de negócios, a empresa não tem (ou tem menor) responsabilidade pelo ciclo de vida do produto, e as transações geralmente são únicas e independentes entre si. No entanto, podem ser adicionados alguns serviços extras. Garantias estendidas, bem como contratos de reparo e manutenção, podem representar uma fonte de valor para o cliente dentro desses modelos de negócios.

A principal fonte de receita é representada pelas vendas de produtos, nas quais muitas vezes está incluído um componente relacionado a serviços pré-venda. Assim, os modelos de negócios com foco no produto não alteram o incentivo para as empresas maximizarem as vendas de produtos. Portanto, por meio desse tipo de modelo, é incomum para as empresas atingirem objetivos de Economia Circular, uma vez que raramente as soluções oferecidas aumentam a eficiência dos recursos, estendem a vida útil do produto ou fecham o ciclo.

2.1.3.2 Orientado para Uso

Neste tipo de modelo de negócio, o cliente não compra o produto. Na verdade, os clientes pagam uma taxa para obter acesso a ele. A empresa também assume a responsabilidade de fornecer serviços ao longo do ciclo de vida, como manutenção, reparo e controle. Além disso, a empresa também tem um forte incentivo para projetar um produto em termos dos elementos que podem ser reutilizados após a vida útil do produto.

Novamente, o produto deve ser fácil de manter quando um contrato de manutenção é assinado, ou para que as peças sejam facilmente reutilizadas quando um acordo de devolução é feito. Como a empresa retém a propriedade do produto, e os usuários podem mudar durante sua vida útil, o produto deve permitir atualizações, alcançando assim uma vida útil mais longa.

Neste tipo de modelo de negócio, serviços avançados, como monitoramento remoto e diagnóstico, treinamento avançado, consultoria em processos habilitados por produtos, bem como manutenção preditiva, são cruciais. Os custos internos para essas atividades precisam ser melhor quantificados do que nos modelos de negócio orientados para produtos - alugar ou emprestar produtos em vez de vendê-los aumentaria os custos da empresa, pois exigiria altos

investimentos de capital iniciais. Assim, os recursos financeiros se tornam críticos, e o período de retorno muitas vezes é mais longo do que nas vendas de produtos físicos.

Modelos de Negócio Orientados para Uso são mais promissores do que os orientados para produtos na consecução dos objetivos de Economia Circular, pois intensificam o uso de materiais, por exemplo, por meio do compartilhamento, aumentando assim a eficiência dos recursos. Se acordos avançados de manutenção ou devolução forem assinados, os outros impulsionadores de valor da Economia Circular (ou seja, estender a vida útil do produto e fechar o ciclo) também podem ser buscados por meio deste tipo de modelo de negócio. No entanto, os modelos de negócio orientados para o uso (como compartilhamento, locação, pagamento por uso) podem levar a um uso menos cuidadoso pela base de clientes, levando a um desgaste mais rápido, questionando assim a busca do segundo impulsionador de valor da Economia Circular.

2.1.3.3 Orientado para Resultados

O cliente não compra o produto ou sistema, mas paga uma taxa variável que depende do alcance de um resultado contratualmente estabelecido, em termos de desempenho do produto/sistema ou resultado de seu uso. Assim, o valor é gerado por uma combinação individualizada e integrada de produtos e serviços para produzir os resultados esperados.

Uma rede de serviços de campo é um requisito para a entrega bem-sucedida de serviços tradicionais e avançados, onde técnicos de campo interagem frequentemente com os clientes, e os clientes tendem a confiar mais neles. Nesse sentido, sistemas de colaboração online ou baseados na web servem como uma ferramenta adicional.

O cerne deste conceito é que o cliente compra o desempenho, não o produto e os serviços relacionados. Assim, a empresa é responsável por todos os custos do ciclo de vida. Isso, por sua vez, fornece um incentivo poderoso para projetar produtos para a Economia Circular, seguindo as políticas de design introduzidas na seção 2.1.2. Além disso, a empresa tem o incentivo de minimizar o custo total do ciclo de vida, reduzindo assim os custos operacionais (por exemplo, aumentando a eficiência dos recursos), ampliando a vida útil do produto e os recolhendo para permitir múltiplos ciclos de vida. Portanto, este tipo de modelo de negócios permite que as empresas alcancem a Economia Circular por meio dos seus três impulsionadores de valor.

Os modelos de negócios focados em resultados podem ser os mais eficazes para avançar em direção à Economia Circular. No entanto, geralmente é difícil medir resultados e desempenho do produto/sistema, e chegar a um acordo entre cliente e fornecedor a esse respeito.

2.1.4 Transição a Economia Circular

A Fundação Ellen MacArthur (2015) propôs o modelo ReSOLVE (*Regenerate, Share, Optimize, Loop, Virtualize, Exchange*) para orientar as organizações na implementação dos princípios da Economia Circular:

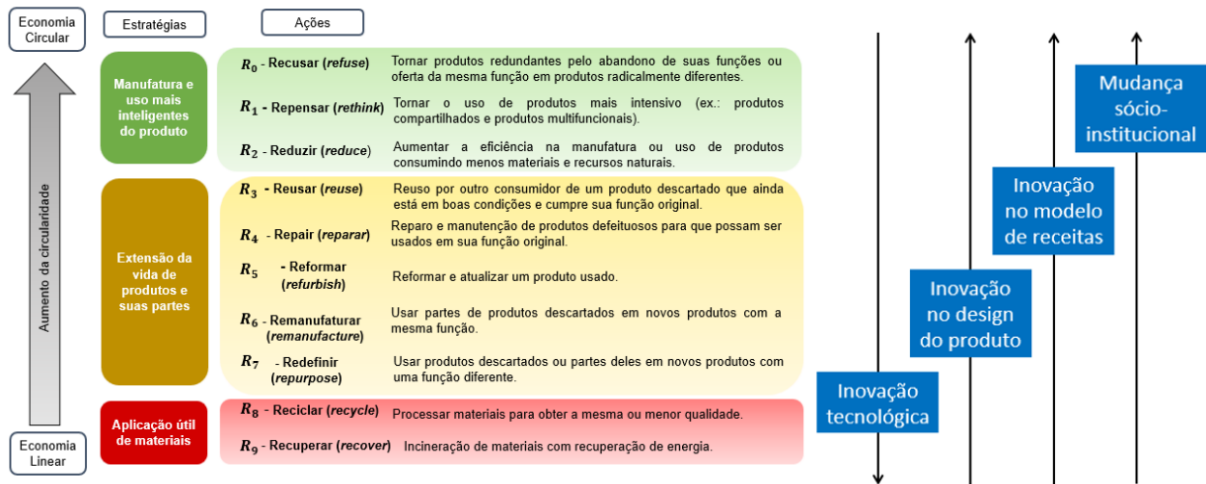
- **Regenerar:** esta abordagem baseia-se na transição para energia e materiais renováveis. Ciclos biológicos são utilizados para permitir a circulação de energia e materiais, convertendo resíduos orgânicos em fontes de energia e matéria-prima para outras cadeias produtivas.
- **Compartilhar:** Inserido numa perspectiva de economia compartilhada, onde bens e ativos são compartilhados entre indivíduos, a propriedade perde importância. Como resultado, os produtos devem ser projetados para durar mais tempo, e a manutenção deve estar disponível para permitir a reutilização e extensão da vida útil do produto.
- **Otimizar:** Uma estratégia centrada em tecnologia. Este modelo requer que as organizações utilizem tecnologias de manufatura digital, como sensores, automação, identificação por radiofrequência (RFID) e Big Data para reduzir o desperdício nos sistemas de produção ao longo das cadeias de abastecimento. As organizações se beneficiarão do aumento de desempenho; por exemplo, um esquema de manutenção preditiva pode ser planejado com base em dados em tempo real sobre as condições das máquinas.
- **Ciclo:** baseado em ciclos biológicos e técnicos. Ciclos biológicos, como a digestão anaeróbica, são importantes para recuperar o valor de resíduos orgânicos; ciclos técnicos podem restaurar o valor de produtos e embalagens pós-consumo por meio de reparo, reutilização, remanufatura e reciclagem.
- **Virtualizar:** Uma estratégia focada em serviços que substitui produtos físicos por produtos virtuais e desmaterializados.

Na questão das estratégias usadas para implementação da Economia Circular o modelo dos 3Rs (reduzir, reusar e reciclar) e suas variações são os principais métodos estudados e aplicados (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016, Potting *et al.*, 2017, Kirchherr *et al.*, 2017, Morseletto, 2019, Fernandes, 2023, Hanemaaijer *et al.*, 2023).

Segundo Potting *et al.* (2017) todas as estratégias R são muito semelhantes, distinguindo-se principalmente pela quantidade de estratégias de circularidade que propõem. Geralmente, apresentam uma variedade de propostas dispostas em ordem decrescente de circularidade.

Dentre as variações o modelo dos 10Rs criado por Potting *et al.* (2017) abrange uma ampla variedade de estratégias de forma compreensiva (Morseletto, 2019), introduz categorias para o agrupamento das mesmas e diretrizes para suas seleções (Fernandes, 2023), como exemplificado e detalhado na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Os 10 Rs da Economia Circular



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As 10 estratégias (R0 a R9) são separadas em três categorias: uso mais inteligente de produtos, extensão do tempo de vida dos produtos e a aplicação útil dos materiais. Em relação a implementação delas quanto mais próximo da circularidade, menor o número, maiores investimentos são necessários em inovações no design, método produtivo e na cultura socioinstitucional, enquanto as estratégias menos circulares, maior número, necessitam de mais investimentos em inovações tecnológicas.

A transição a uma Economia Circular não se limita apenas a transformações significativas nos métodos de produção; ela demanda também uma redefinição dos papéis desempenhados por consumidores e demais partes interessadas na execução de novos modelos de negócio alinhados aos princípios circulares. Enquanto o paradigma econômico linear relega os consumidores ao papel final na cadeia, confinando sua contribuição à simples aquisição de produtos, a Economia Circular propõe uma perspectiva distinta. Nesse contexto, os consumidores emergem como agentes ativos, conscientes de seu papel como intermediários cruciais entre o varejo e o processo de recolhimento de resíduos. Essa mudança de perspectiva busca envolver os consumidores, junto a outros atores da cadeia, em uma participação mais efetiva e engajada (Almeida; Aguiar; Jugend, 2021).

2.2 INDÚSTRIA 4.0

Na sua origem acadêmica a Indústria 4.0 e a Quarta revolução industrial eram termos que abordavam distintas transformações. Enquanto o primeiro se referia a inovações tecnológicas voltadas para a indústria, o último englobava o impacto dessas transformações na sociedade e no governo. Ainda assim, de maneira geral, diversos autores têm utilizado esses conceitos de forma intercambiável, uma vez que seus papéis e valores são, em essência, os mesmos (Sung, 2018). Desse modo, para efeitos deste trabalho, a Indústria 4.0 será considerada como sinônimo da Quarta Revolução Industrial.

A expressão Indústria 4.0 foi inicialmente apresentada durante a Feira de Hannover, em 2011, como parte de um projeto de pesquisa estratégica promovido pelo governo alemão, foi caracterizada como um aprimoramento da flexibilidade na cadeia de valor, alcançado por meio da implementação de Sistemas Físicos Cibernéticos que possibilitariam a auto adaptação de máquinas e instalações, capacitando-as a responder de forma autônoma a novas demandas e mudanças nas condições operacionais (Shrouf; Ordieres; MiragIInternet das Coisasta, 2014) . Em 2013, o termo foi oficialmente anunciado pelo governo da Alemanha no título de sua estratégia, desenvolvida por Kagermann, Wahnke e Helbig, para estabelecer o país como líder no setor de manufatura (Xu; Xu; Li, 2018). Lasi *et al.* (2014) atribuem a rápida disseminação do conceito da Indústria 4.0 a essa ação do governo Alemão, porém destacam que, até o ano de 2014, o termo era muito pouco conhecido fora do país.

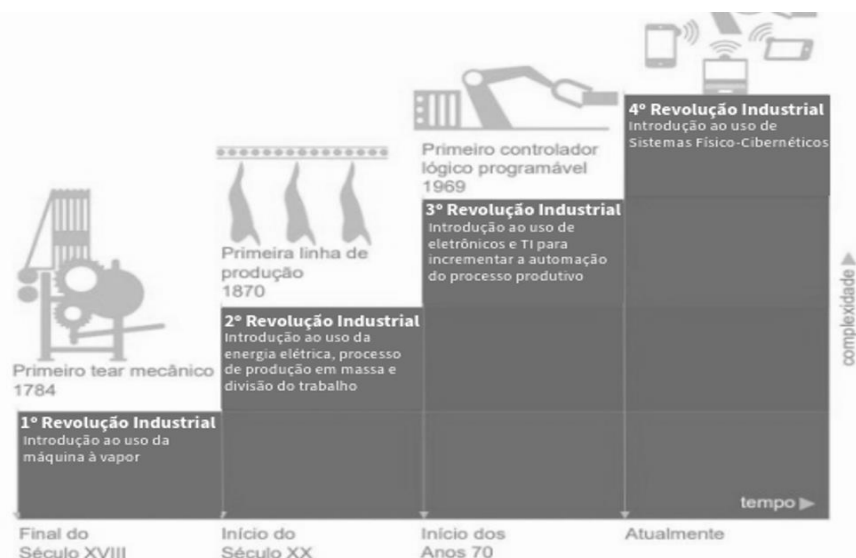
Em um curto espaço de tempo isso mudou e a expressão Indústria 4.0 se tornou amplamente popular e objeto de extensa pesquisa. De acordo com Oztemel e Gursev (2018), essa expressão foi recentemente introduzida e já conquistou ampla aceitação, não apenas na esfera acadêmica, mas também na industrial. Enquanto a comunidade acadêmica se dedica à compreensão e à definição desse conceito, além de buscar o desenvolvimento de sistemas correlatos, modelos de negócios e metodologias correspondentes, o setor industrial concentra-se na transformação dos equipamentos industriais, na criação de produtos inteligentes e nos potenciais clientes envolvidos nesse progresso.

2.2.1 Breve Histórico

Ao longo das últimas décadas, a indústria experimentou diversas transformações que alteraram de maneira significativa os processos de produção. A Figura 4 abaixo exemplifica as etapas desta evolução descritas como (Rojko, 2017; Santos, 2022):

- Primeira Revolução Industrial (1760 – 1840): este período revolucionário, que teve a Inglaterra como seu epicentro, testemunhou a transição do trabalho manual para a manufatura por meio de máquinas movidas a vapor. Essa mudança proporcionou não apenas ganhos significativos de produtividade, mas também o surgimento de indústrias em grande escala. A busca por melhorias na qualidade de vida foi o principal impulsionador da mudança.
- Segunda Revolução Industrial (1850-1945): foi marcada pela introdução da energia elétrica nas linhas de montagem, transformando a indústria e o cotidiano. A eletricidade impulsionou o processo de produção em massa e de divisão do trabalho, resultando em significativas evoluções. Esse novo modelo possibilitou a produção de bens a custos mais acessíveis, promovendo a inserção tecnológica na indústria e despertando o interesse global por uma liderança tecnológica.
- Terceira Revolução Industrial (1970 – 2010): esse período foi marcado pelo início da globalização, aumento da competitividade e alterações nos processos de trabalho. O principal avanço foi a automação dos processos industriais, impulsionada pela introdução da eletrônica, tecnologia da informação e computadores.
- Quarta Revolução Industrial (2011 - atual): a digitalização, impulsionada por avanços mecânicos, elétricos e eletrônicos, visa aprimorar a inteligência e promover autonomia diante dos desafios industriais. A convergência tecnológica, unindo o mundo físico virtual através da internet, é a base para a automação inteligente com conectividade avançada que possibilitam uma produção em massa flexível e adaptável.

Figura 4 - Estágios das Revoluções Industriais



Fonte: Adaptado de Kagermann, Wahnke e Helbig (2013)

2.2.2 Conceitos

A Indústria 4.0, segundo Santos (2022), é um sistema produtivo que se caracteriza pela integração de dispositivos móveis conectados à internet ou intranet. Esse modelo permite a programação, gerenciamento, controle, cooperação e interação remota de qualquer local com o sistema de produção, abrangendo toda a cadeia de valor, incluindo empresas, fornecedores e demais partes envolvidas.

Wang *et al.* (2016) reforçam essa ideia ao descreverem a Indústria 4.0 como um sistema que utiliza tecnologias emergentes, desenvolvimento rápido de máquinas e ferramentas para enfrentar desafios globais na indústria. A ênfase está na aplicação de tecnologia de informação avançada para implantar serviços de Internet das Coisas. O objetivo é garantir uma produção ágil e uniforme, minimizando a ociosidade e resultando em produtos de alta qualidade, sistemas eficientes e custos reduzidos.

Hermann, Pentek e Otto (2015) propõem seis princípios a serem usados para identificar ideias e projetos relevantes a Indústria 4.0. Esses princípios constituem diretrizes fundamentais para empresas que buscam integrar efetivamente componentes dessa nova era industrial. O Quadro 1 a seguir define e descreve de forma resumida esses princípios.

Quadro 1 - Princípios para identificação de ideias relacionadas a Indústria 4.0

Princípio	Descrição
Interoperabilidade	Habilidade de promover a comunicação eficiente entre humanos, sistemas e máquinas.
Virtualização	Capacidade de monitorar e gerenciar processos físicos de forma eficaz.
Descentralização	Capacidade do sistema de tomar decisões de forma autônoma.
Trabalho em tempo real	Aptidão para coletar e analisar dados de maneira instantânea.
Orientação a Serviços	Capacidade de disponibilizar funcionalidades além das fronteiras da empresa, utilizando a Internet das Coisas.
Modularidade	Flexibilidade para se adaptar a mudanças, seja por meio de inovações disruptivas ou evolutivas.

Fonte: adaptado Hermann, Pentek e Otto (2015)

2.2.3 Pilares

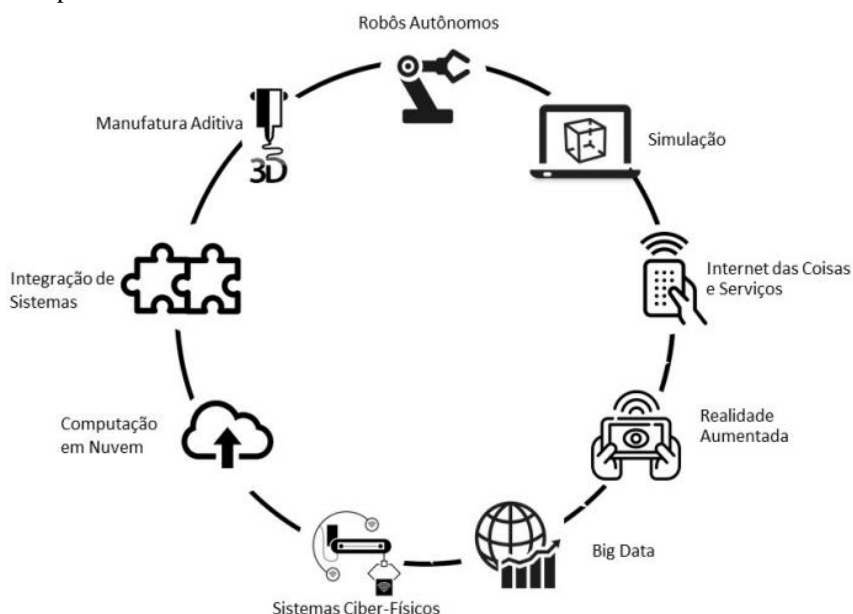
A Indústria 4.0 representa uma revolução no processo produtivo fundamentada em nove pilares essenciais delineados por Rüßman *et al.* (2015): Robôs Autônomos, Simulação, Internet

das Coisas e Serviços, Realidade Aumentada, Big Data, Sistemas Ciber físicos, Nuvem, Integração de Sistemas e Manufatura Aditiva.

Esses elementos convertem as tradicionais células de produção isoladas em um fluxo integrado, automatizado e otimizado. Essa transformação não apenas redefine a interação entre humanos e máquinas, mas também reconfigura as relações entre fornecedores, produtos e clientes, marcando uma mudança significativa no paradigma indústria. A Figura 5 abaixo representa os nove pilares como concebidos por seus autores.

Os sistemas de produção já incorporam grande parte desses elementos fundamentais, contudo, os operam de forma isolada. A Indústria 4.0, conforme destacado por Rüßmann *et al.* (2015), introduz um diferencial ao integrar completamente esses avanços tecnológicos.

Figura 5 - Os nove pilares da Indústria 4.0



Fonte: adaptado de Kagermann, Wahnke e Helbig (2013)

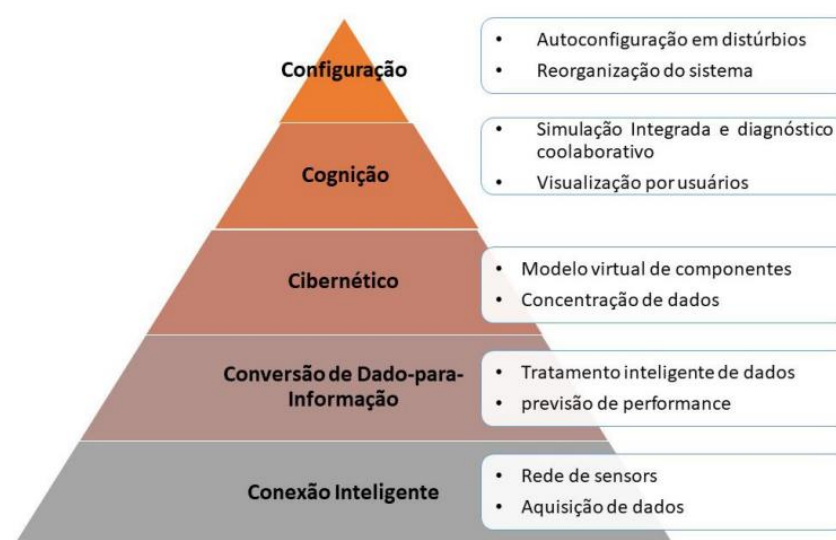
2.2.3.1 Sistemas Ciber físicos

A base fundamental da Indústria 4.0 reside nos Sistemas Ciber físicos (Lee; Bagheri; Kao, 2015, Zhou; Liu; Liang, 2016, Xu; Xu; Li; 2018). Neles, componentes físicos e de software estão profundamente entrelaçados, operando em escalas espaciais e temporais distintas e interagindo de maneiras diversas que se transformam com o contexto. São comumente compostos por sensores, unidades de processamento de dados, medidores, acionadores, atuadores e outros elementos, esses sistemas incorporam funcionalidades de imagem e controle nas operações relevantes, destacando-se pela capacidade de resposta a qualquer feedback

gerado. Essa característica crucial possibilita o controle em tempo real e a verificação dos retornos do processo, garantindo a geração de saídas esperadas (Oztemel; Gursev, 2018).

De acordo com Lee, Bagheri e Kao (2015), a Arquitetura 5C representa uma estrutura que delinea de maneira clara, por meio de uma sequência de etapas, a construção de um Sistema Ciber físico. Essas etapas abrangem desde a coleta inicial de dados, percorrendo o processo analítico, até culminar na geração de valor. A Figura 6 abaixo mostra as camadas e a hierarquia da Arquitetura 5C.

Figura 6 - Arquitetura 5C para construção de Sistemas Ciber físicos



Fonte: Pisching *et al.* (2017)

- **Conexão Inteligente:** obtenção de dados precisos e confiáveis provenientes de máquinas e seus componentes. Esses dados podem ser diretamente medidos por sensores ou obtidos a partir de sistemas de controle ou fabricação empresarial. Essa coleta de informações é crucial para o correto funcionamento e eficácia do sistema, garantindo uma base sólida.
- **Conversão Dado-para-Informação:** A extração de informações relevantes é necessária a partir dos dados. Isso envolve o processamento dos dados obtidos na camada mais baixa, convertendo-os em informações que podem ser analisadas para obter conclusões sobre o funcionamento do sistema.
- **Cibernética:** a camada cibernética atua como o ponto central de informações, dando origem ao modelo virtual do sistema. As informações são enviadas para ela de cada máquina conectada para formar a rede de máquinas. Com a coleta de uma quantidade massiva de informações, é necessário utilizar análises específicas para extrair dados

adicionais que forneçam uma compreensão aprimorada sobre o status das máquinas individuais dentro da frota. Essas análises proporcionam capacidade de autoavaliação, permitindo que o desempenho de uma única máquina seja comparado e avaliado em relação à frota. Do outro lado, é possível comparar o desempenho aos de ativos anteriores (informações históricas) para prever o comportamento futuro.

- **Cognição:** ao chegar nesta camada já é possível ter uma compreensão abrangente do sistema monitorado. A apresentação adequada do conhecimento adquirido aos usuários especializados favorece a tomada de decisões corretas. Com informações comparativas e o status individual das máquinas disponíveis, é possível tomar decisões sobre a prioridade de tarefas para otimizar o processo. Nesse contexto, a utilização de infográficos adequados é essencial para transmitir totalmente o conhecimento adquirido aos usuários.
- **Configuração:** representa o retorno do ciberespaço para o espaço físico e atua como um controle supervisor para permitir que as máquinas se autoconfigurem e se adaptem autonomamente. Esta etapa funciona como um sistema de controle para aplicar as decisões corretivas e preventivas, anteriormente tomadas no nível de cognição, ao sistema monitorado.

Em termos gerais, um Sistema Ciber físico típico pode desempenhar diversas funções cruciais na indústria manufatureira (Oztemel; Gursev, 2018):

- Monitoramento de processos, garantindo uma supervisão constante das operações.
- Aplicabilidade em diversos domínios, contribuindo para a geração de sistemas em larga escala.
- Integração de disciplinas variadas em diferentes setores.
- Garantia de uma confiabilidade eficaz no funcionamento.
- Interatividade significativa com os usuários.
- Monitoramento em tempo real do desempenho.
- Configuração, implantação e desativação em tempo real.
- Comportamento e tomada de decisões autônomas.
- Comunicação distribuída e interconectada.

2.2.3.2 Integração dos Sistemas

Kagermann, Wahnster e Helbig (2013) e Wang *et al.* (2016) caracterizam a Integração dos Sistemas em três níveis:

- **Integração Horizontal:** uma corporação deve simultaneamente competir e cooperar com diversas outras corporações de ramos relacionados. Através da integração horizontal entre elas, é possível formar um ecossistema eficiente, permitindo o fluxo de informações, finanças e materiais. Isso possibilita o surgimento de novas redes de valor e modelos de negócios.
- **Integração Vertical:** uma fábrica, composta por diversos sistemas e departamentos, como controle de produção, planejamento corporativo, sistemas de sensores e atuadores, demanda uma integração entre todos para assegurar seu funcionamento sinérgico e otimizado. Essa integração permite que as máquinas inteligentes se organizem de forma autônoma, se reconfigurando dinamicamente para adaptar-se a produção de diferentes tipos de produtos; além de coletar e tratar um grande volume informações para tornar o processo de produção eficiente e transparente.
- **Integração de Engenharia de Ponta a Ponta:** em um processo de criação de valor focado no produto, é essencial que toda a cadeia de atividades, desde a identificação dos requisitos do cliente até a reciclagem do produto, esteja integrada por meio de um modelo de produção contínuo e coerente. Isso possibilita antever o impacto do design do produto na produção e no serviço, utilizando ferramentas poderosas de software, para viabilizar produtos personalizados.

2.2.3.3 Internet das Coisas

Formulada em 1999 pelo empreendedor britânico e pioneiro da tecnologia Kevin Ashton, o conceito de Internet das Coisas abrange a interconectividade entre uma variedade de componentes, como dispositivos eletrônicos, smartphones, máquinas e meios de transporte. Essa interação entre as “coisas” ocorre por meio de uma codificação exclusiva, tais como RFID, código de barras, QR code, Bluetooth, entre outros, possibilitando uma comunicação eficiente com o propósito de alcançar objetivos comuns previamente determinados (Shafique *et al.*, 2020).

A Internet das Coisas, conforme destacado no estudo de Rüßmann *et al.* (2015), é frequentemente estruturada em uma pirâmide de automação vertical. Nessa configuração,

sensores e dispositivos de campo, dotados de inteligência limitada, estão integrados a controladores de automação que alimentam um sistema abrangente de controle do processo de fabricação. Essa organização possibilita a comunicação e interação entre os dispositivos de campo promovendo a descentralização das análises e tomadas de decisão, permitindo respostas em tempo real.

2.2.3.4 Big Data

O avanço recente das tecnologias associadas a Indústria 4.0 levou a crescente disponibilidade de sensores, sistemas de aquisição de dados e redes de computadores, e, conseqüentemente, tem conduzindo a indústria contemporânea a adotar metodologias de alta tecnologia. Como resultado, o uso cada vez maior de sensores e máquinas interconectadas tem gerado continuamente grandes volumes de dados, caracterizados como Big Data (Lee; Bagheri; Kao, 2015).

A utilização do Big Data é fundamental para aprimorar a tomada de decisões, destacando-se pela análise de extensas bases de dados de maneira dinâmica e em tempo real. Neste contexto, as informações são tratadas de forma a permitir variações nas análises conforme a necessidade. Para garantir processos eficientes e uma operação de alta qualidade no contexto da Indústria 4.0, é fundamental realizar uma coleta de dados abrangente, garantindo feedback para todos os componentes do processo produtivo. Nesse cenário, surgem elementos como os Sistemas Ciber físicos e a Internet das Coisas, desempenhando um papel significativo na integração e otimização desse ambiente complexo (Teixeira; Teixeira, 2021).

2.2.3.5 Nuvem

A evolução tecnológica contínua tem transformado a forma como gerenciamos dados e sistemas. A nuvem, composta por hardwares, redes de armazenamento e interfaces, oferece serviços de computação como produto final, representando uma espécie de internet aprimorada. Esse novo paradigma, conhecido como Nuvem, supera diversas limitações do ambiente computacional tradicional, resultando em significativas reduções nas variáveis de espaço, tempo, energia e custo (Santos, 2022).

À medida que as tecnologias avançam, a gestão de dados está migrando das abordagens tradicionais para soluções baseadas em nuvem. Este ambiente permite a entrega de sistemas mais rápidos, atualizações ágeis e modelos de desempenho sempre atualizados. A tecnologia

em nuvem é essencialmente um serviço de armazenamento online que oferece conveniência operacional com aplicativos baseados na web, dispensando a necessidade de instalação. Esse modelo facilita as operações, garantindo que clientes e funcionários acessem os mesmos dados simultaneamente. Os sistemas em nuvem reduzem custos, eliminam a complexidade da infraestrutura, expandem o espaço de trabalho, protegem dados e oferecem acesso à informação a qualquer momento (Oztemel; Gursev, 2018).

As soluções em nuvem representam uma excelente alternativa para lidar com o Big Data. Dado que computadores tradicionais podem não ser capazes de gerenciar eficientemente grandes conjuntos de dados, utilizar um sistema em nuvem torna-se uma opção mais fácil e eficaz para realizar as análises necessárias.

2.2.3.6 Robôs Autônomos

Na esfera industrial, o uso de robôs é uma prática já estabelecida, para desempenhar tarefas complexas em prazos reduzidos. Com a ascensão da Indústria 4.0, os robôs autônomos ganham destaque, caracterizando-se por sua notável flexibilidade, funções avançadas e facilidade operacional em diversas áreas. Essa progressão aponta para um cenário futuro em que os robôs não só executarão tarefas, mas interagirão ativamente entre si e com seres humanos. A tendência é que esses dispositivos se tornem mais acessíveis e sofisticados, visando aprimorar suas capacidades em comparação aos modelos presentes na manufatura contemporânea. Adicionalmente, eles se destacam por custos reduzidos e uma ampla gama de recursos, superando as limitações dos dispositivos utilizados na produção atual (Frank; Dalenogare; Ayala, 2019).

Um ponto importante ressaltado por Thoben, Wiesner e Wuest (2017) é a distinção entre robôs de automação e robôs colaborativos. Os primeiros são projetados para automatizar processos operacionais. Já os robôs colaborativos são concebidos para interagir com seres humanos, desempenhando funções que contribuem para aprimorar a flexibilidade e produtividade. Essa diferenciação é essencial para compreender a aplicação e o impacto dessas tecnologias, uma vez que a automação busca otimizar processos produtivos, enquanto os robôs colaborativos visam uma cooperação eficaz entre humanos e máquinas.

2.2.3.7 Simulação

A resolução eficaz de problemas é fundamental no processo de desenvolvimento de produtos, sendo a metodologia de simulação um elemento essencial para assegurar qualidade e eficiência. Essa abordagem possibilita a utilização de dados em tempo real para replicar fielmente o mundo físico em um modelo virtual. Através da prototipagem virtual e do emprego de técnicas modulares de simulação e modelagem, unidades descentralizadas têm a capacidade de modificar os produtos, facilitando assim uma inovação ágil (Teixeria; Teixeira, 2021).

Segundo Asadollahi-Yazdi *et al.* a essência desse conceito reside na expansão da aplicação da modelagem de simulação a todas as etapas do ciclo de vida do produto. Nesse contexto, os produtos são inicialmente desenvolvidos e minuciosamente testados em um ambiente virtual que incorpora máquinas, produtos e intervenção humana. Essa abordagem aproveita as informações geradas e coletadas nas fases anteriores para orientar a configuração da produção física. A integração dos dados do mundo real com os modelos de simulação do projeto possibilita previsões precisas relacionadas à produtividade e manutenção, fundamentadas em dados realistas. Além disso, essa metodologia contribui significativamente para a redução do tempo necessário para configurar as máquinas, resultando em um aumento substancial na velocidade e qualidade de produção.

2.2.3.8 Realidade Aumentada

A concepção da Realidade Aumentada originou-se com a finalidade de integrar harmoniosamente o universo virtual ao mundo real, buscando torná-los praticamente indiscerníveis. Essa tecnologia teria a capacidade singular de sobrepor, numa única interface, elementos digitais e objetos reais (Cuperschmid, Martins, Ruschel, 2011).

A ascensão das demais tecnologias da Indústria 4.0 eleva a Realidade Aumentada a uma ferramenta extremamente atrativa para as indústrias, graças às inúmeras aplicações viáveis dentro de um contexto fabril. Sua utilização ganha destaque em projetos de expansão de plantas industriais, simulação de ambientes operacionais para treinamentos de segurança, realocação de equipamentos e tubulações, etc. A natureza multidisciplinar da Realidade Aumentada vai além da simples computação gráfica, permitindo a mitigação de riscos de acidentes em ambientes previamente pouco controlados. Essa versatilidade posiciona a Realidade Aumentada como uma peça fundamental na busca por ambientes industriais mais seguros e

eficientes, alinhados com as demandas contemporâneas da Indústria 4.0 conforme destacado por Walsh *et al.* (2017) em seu trabalho sobre o futuro da mineração.

2.2.3.9 Manufatura Aditiva

A fabricação aditiva é o método de criar um objeto construindo-o camada por camada. Ao contrário da fabricação subtrativa, na qual um objeto é criado cortando um bloco sólido de material até que o produto final esteja completo. Tecnicamente, a fabricação aditiva pode se referir a qualquer processo em que um produto é criado construindo algo, como a moldagem, mas geralmente se refere à impressão 3D. A Manufatura Aditiva é uma tecnologia que existe desde dos anos 80, no entanto apenas na década de 2010, quando ocorreu a expiração das patentes fundamentais para a maioria dos métodos originais de impressão 3D, uma nova onda de interesse e investimentos a impulsionaram. Atualmente essa tecnologia está se tornando mais rápida e confiável, consolidando-se como uma técnica de fabricação não apenas para protótipos, mas também para a produção avançada de peças. Os formatos das impressoras 3D estão ampliando-se em tamanho e variedade, incluindo plataformas mais robóticas e de grande escala (Jones, 2023).

Entre as vantagens apresentadas por essa abordagem, destacam-se a versatilidade na escolha de materiais e a habilidade de superar limitações, principalmente em relação a formatos, que outros modos de fabricação podem encontrar. Esse método encontra aplicação significativa nos setores aeroespacial, automotivo e de saúde. As indústrias têm adotado essa modalidade de produção como estratégia para obter uma vantagem competitiva, visto que possibilita a redução do tempo de ciclo do produto, proporciona maior valor agregado e permite um elevado grau de personalização (Santos, 2022).

3 METODOLOGIA

Este capítulo visa introduzir a pesquisa conduzida para identificar os impactos e benefícios decorrentes da transição para uma Economia Circular alinhada aos princípios da Indústria 4.0.

3.1 CLASSIFICAÇÃO

A classificação da pesquisa abrange diversos aspectos, tais como método, abordagem, natureza, objetivos e procedimentos. Neste trabalho, a pesquisa realizada segue a categorização apresentada no Quadro 2 abaixo.

Quadro 2 - Classificação do trabalho

Aspecto	Classificação	Justificativa
Método	Indutivo	O pensamento percorre um caminho partindo de fatos particulares para fatos universais. Nesse contexto, a generalização se evidencia após a observação de dados, por exemplo, na análise de artigos científicos (ZANELLA, 2011).
Abordagem	Qualitativa-Quantitativa	A interpretação das informações quantitativas é feita de forma numérica (gráficos e tabelas), e os dados qualitativos são tratados a partir da observação, interação participativa e interpretação das informações com base no discurso dos sujeitos (SILVA, 2016).
Natureza	Aplicada	Visa produzir conhecimentos científicos para aplicação prática voltada para a solução de problemas concretos, específicos da vida moderna (FONTELLES et al., 2009).
Objetivos	Exploratória- Descritiva	Caracterizada como exploratória, pois tem a finalidade de ampliar o conhecimento a respeito de um determinado fenômeno, e descritiva, pois procura conhecer a realidade estudada, suas características e seus problemas (ZANELLA, 2011).
Procedimentos	Bibliográfica	Estudo sistematizado desenvolvido com base em material publicado em livros, revistas, jornais, redes eletrônicas, ou seja, material acessível ao público em geral, com o propósito de familiarizar o pesquisador com o conhecimento já existente sobre a pesquisa (MORESI, 2003).

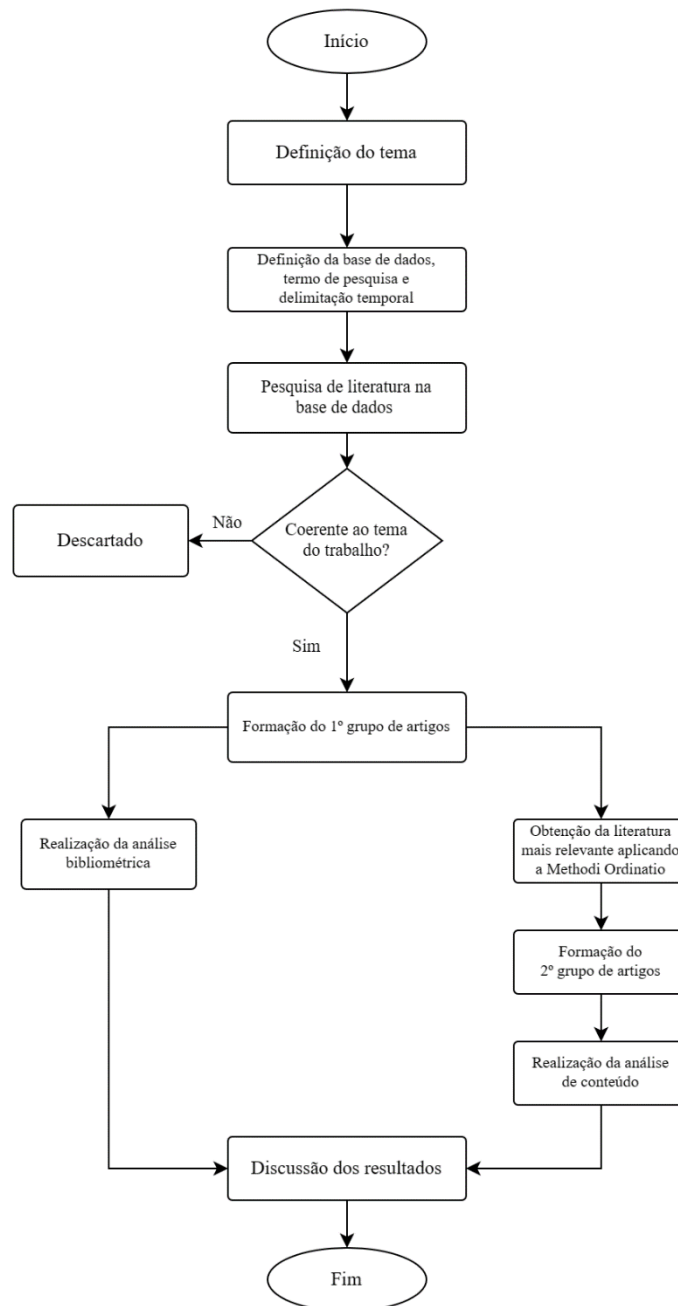
Fonte: elaborador pelo autor (2023)

3.2 DELINEAMENTO DO TRABALHO

A execução de uma Revisão Sistemática de Literatura é marcada pelo emprego de critérios explícitos, rigorosos e transparentes. Esses critérios são essenciais para a identificação, síntese e avaliação crítica abrangente de toda a literatura relacionada a um tema específico, com o propósito de abordar uma questão de pesquisa de maneira eficaz (Camilo; Garrido, 2019).

A Figura 7 a seguir delinea o procedimento utilizado na elaboração deste trabalho.

Figura 7 - Delineamento do trabalho



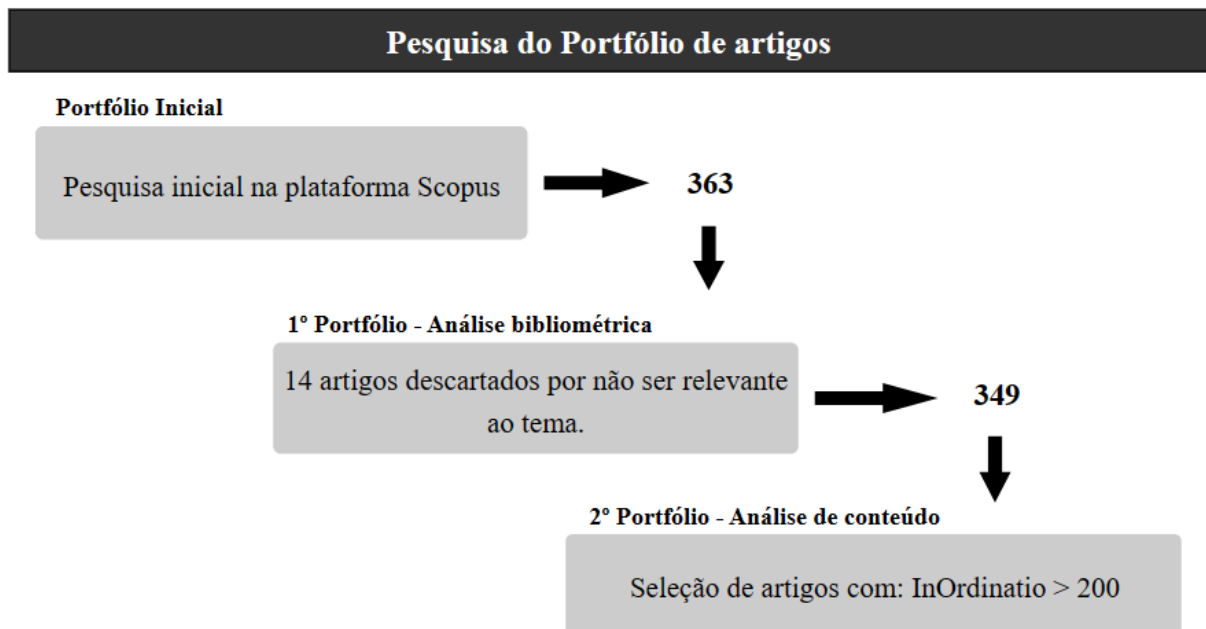
Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Para realização desta Revisão Sistemática de Literatura foram analisados dois conjuntos de artigos. O primeiro conjunto, proveniente da pesquisa inicial na base de dados, foi utilizado para realizar uma Análise Bibliométrica. Já o segundo conjunto de artigos foi compilado após a aplicação da metodologia Methodi Ordinatio para então ser utilizado em uma análise qualitativa.

3.2.1 Procedimentos Técnicos

A seguir serão apresentadas e descritas as etapas seguidas na realização da pesquisa deste trabalho. A Figura 8 exemplificada os passos para a obtenção dos portfólios de artigos.

Figura 8 – Formação do portfólio de artigos



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

3.2.1.1 Pesquisa preliminar nas bases de dados

Na base de dados Scopus, foram examinadas palavras-chave pertinentes ao tema. Nessa etapa preliminar, o objetivo é obter uma compreensão abrangente da disponibilidade de informações associadas às palavras-chave testadas: “indústria 4.0”, “quarta revolução industrial”, “4ª revolução industrial” e “economia circular”.

3.2.1.2 Definição das palavras chave, base de dados e delimitação temporal

As palavras-chave “indústria 4.0”, “quarta revolução industrial”, “4ª revolução industrial” e “economia circular” foram escolhidas devido à abundância e ampla disponibilidade de artigos relacionados. A base de dados selecionada para esta pesquisa foi a Scopus, reconhecida por sua abrangência e ampla utilização no meio acadêmico (Rosa et al., 2019). Não foi estabelecida uma delimitação temporal considerando a natureza relativamente recente da temática.

3.2.1.3 Pesquisa definitiva nas bases de dados

A busca definitiva dos artigos foi realizada no dia 6 de outubro de 2023 utilizando os critérios apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Critérios usados na busca na base de dados

Critério usado	Termo na pesquisa na base de dados Scopus
Contenham em seu título, resumo ou palavras-chave os termos em inglês “industry 4.0” ou ”fourth industrial revolution” ou ”4th industrial revolution	(TITLE-ABS-KEY (“industry 4.0” OR ”fourth industrial revolution” OR ”4th industrial revolution”))
E contenham em seu título, resumo ou palavras-chave o termo em inglês “circular economy”	AND TITLE-ABS-KEY (“circular economy”)
Apenas artigos	AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, ”ar”))
Apenas publicações em inglês	AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, ”English”))
Apenas publicações em revistas	AND (LIMIT-TO (SRCTYPE, ”j”))

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A pesquisa retornou um total de 363 artigos que continham as palavras-chaves, foram escritos em inglês e publicados em revistas.

3.2.1.4 Procedimentos de filtragem

Foi realizada a análise das palavras-chaves e a leitura dos resumos desse portfólio de artigos preliminares. Nesse processo, 14 artigos que não se enquadravam no escopo da pesquisa foram eliminados. O portfólio resultante contendo 349 artigos foi então utilizada na realização da análise bibliométrica

3.2.1.5 Identificação do Fator de Impacto, ano de publicação e número de citações:

Em 2015, Pagani et al. introduziram a metodologia de ordenação *Methodi Ordinatio*, concebida para construir portfólios bibliográficos sobre qualquer tema de pesquisa, de modo a facilitar o mapeamento da literatura relevante. Segundo Campos *et al.* (2018) e Carvalho *et al.* (2020) a classificação resultante proporciona aos pesquisadores uma tomada de decisão eficiente na construção de um portfólio de artigos.

Três fatores fundamentam a metodologia proposta:

- **Fator de Impacto:** evidencia a relevância da revista onde o artigo foi publicado. Quanto mais elevado o Fator de Impacto, mais significativa é a contribuição do artigo, conferindo a revista um status mais relevante no cenário científico.
- **Ano de Publicação:** a temporalidade do artigo desempenha um papel crucial na avaliação da sua atualidade. Artigos mais recentes tendem a oferecer maior inovação e novidades, refletindo avanços mais contemporâneos no campo de pesquisa.
- **Número de Citações:** um indicador direto do reconhecimento na comunidade científica. Quanto maior o número de citações, maior é o reconhecimento e a influência do artigo, evidenciando sua importância e impacto no meio acadêmico

O ano de publicação e o número de citações de cada artigo foram obtidos na plataforma Scopus. Em relação ao fator de impacto foi utilizado o CiteScore disponibilizado pela Elsevier. Zijlstra e McCullough (2016) descrevem-na como uma métrica que proporciona uma visão abrangente, transparente e atualizada do impacto de uma revista.

O cálculo do CiteScore leva em consideração as citações recebidas por um periódico nos últimos três anos, referentes a artigos, resenhas, trabalhos de conferência, capítulos de livros e documentos. Esse valor é então dividido pelo número total de publicações feitas pelo periódico nos últimos três anos.

3.2.1.6 Aplicação do InOrdinatio

O InOrdinatio da metodologia *Methodi Ordinatio* é calculado por meio da seguinte equação:

$$InOrdinatio = \left(\frac{\text{Fator de impacto}}{1000} \right) + \alpha * [10 - (\text{Ano da Pesquisa} - \text{Ano da Publicação})] + \Sigma N^{\circ} \text{ Citações}$$

- O Fator de Impacto é dividido por mil com o intuito de normalizar seu valor em relação aos demais critérios.

- O Fator de Ponderação (α) varia entre valores de 1 a 10 e reflete o peso que o autor da pesquisa atribui a contemporaneidade dos artigos, quanto maior o seu valor maior a influência, positiva, da atualidade do ano de publicação na ordenação dos artigos.

Para o fim deste trabalho o valor do fator de ponderação escolhido foi de 7 para valorizar os avanços mais recentes na Indústria 4.0 e Economia Circular e ao mesmo tempo reconhecendo que conceitos e abordagens mais antigos ainda oferecem perspectivas valiosas.

O cálculo do InOrdinatio foi realizado utilizando a ferramenta de análise de dados Excel e foram selecionados apenas artigos com valor maior que 200, o que resultou em um portfólio final totalizando 21 artigos. A TABELA abaixo mostra portfólio final de artigos.

Tabela 1 - Portfólio de artigos obtidos usando a metodologia Methodi Ordinatio

(continua)

Título do artigo	Ano	Citações	Fator de Impacto	InOrdinatio
Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations	2018	620	7,1	655
Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review	2020	327	18,1	376
Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0	2020	326	20,3	375
A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy	2020	315	18,5	364
Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies	2018	323	5,8	358
Connecting circular economy and industry 4.0	2019	311	41,9	353
Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities	2021	264	17,2	320
The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies	2020	265	16	314
Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals	2020	251	18,5	300
Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development	2021	242	19,3	298

(conclusão)

Título do artigo	Ano	Citações	Fator de Impacto	InOrdinatio
Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance	2020	244	20,3	293
Blockchain and the circular economy	2020	232	12,8	281
Blockchain technology and the circular economy	2021	224	18,5	280
Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations	2020	213	18,5	262
Industry 4.0 and the circular economy: A literature review and recommendations for future research	2021	183	17,8	239
Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy	2021	182	18,5	238
Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy	2020	182	20,3	231
Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers	2021	174	20,3	230
To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP	2021	163	18,5	219
Sustainable industrial and operation engineering trends and challenges Toward Industry 4.0: a data driven analysis	2021	160	4,9	216
Industry 4.0, cleaner production and circular economy	2021	151	18,5	207

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

3.2.1.7 Localização, leitura e análise sistemática dos artigos

A leitura dos artigos foi realizada após a elaboração do portfólio, preparando o caminho para a fase subsequente de análise e discussão de resultados. Nessa etapa, foram realizadas as análises dos portfólios de artigos.

- **Análise bibliométrica:** possibilita examinar o panorama da ciência e tecnologia ao considerar toda a produção científica registrada em um banco de dados. Esse método oferece a capacidade de posicionar um país em relação ao cenário global, uma instituição em relação ao seu país, e cientistas individuais em relação às suas

comunidades científicas. O procedimento baseia-se na avaliação quantitativa de artigos científicos, patentes e citações. Os dados utilizados em estudos bibliométricos podem ser extraídos tanto do conteúdo textual das publicações quanto dos registros bibliográficos, incluindo informações como nome dos autores, título, fonte, idioma, palavras-chave, classificação e citações (Zhu *et al.*, 1999). A bibliometria desempenha um papel crucial na identificação de padrões de crescimento do conhecimento em uma determinada disciplina, na compreensão da dispersão e obsolescência de campos científicos, na identificação dos autores e instituições mais produtivos, além de destacar os periódicos mais frequentemente utilizados na disseminação de pesquisas em áreas específicas do conhecimento (Soares *et al.*, 2016).

- Análise qualitativa: destaca-se por ter como fonte direta dos dados o ambiente natural, tendo o pesquisador como o instrumento central nesse processo. A essência dos estudos qualitativos reside na exploração do mundo empírico em seu contexto natural. Nesse cenário, cabe a ele a observação, seleção, interpretação e registro dos comentários e informações provenientes do mundo natural. Esta pesquisa caracteriza-se pela sua natureza descritiva, focando-se na representação dos fenômenos através dos significados manifestados pelo ambiente. Além disso, os pesquisadores qualitativos concentram-se no processo em si, colocando a ênfase no entendimento de como determinado fenômeno se manifesta (Zanella, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas próximas seções, serão expostos os resultados da análise bibliométrica e da análise qualitativa. Buscando, assim, proporcionar uma compreensão abrangente e aprofundada dos dados obtidos. A análise bibliométrica oferecerá insights quantitativos, enquanto a análise qualitativa fornecerá uma perspectiva mais detalhada e interpretativa.

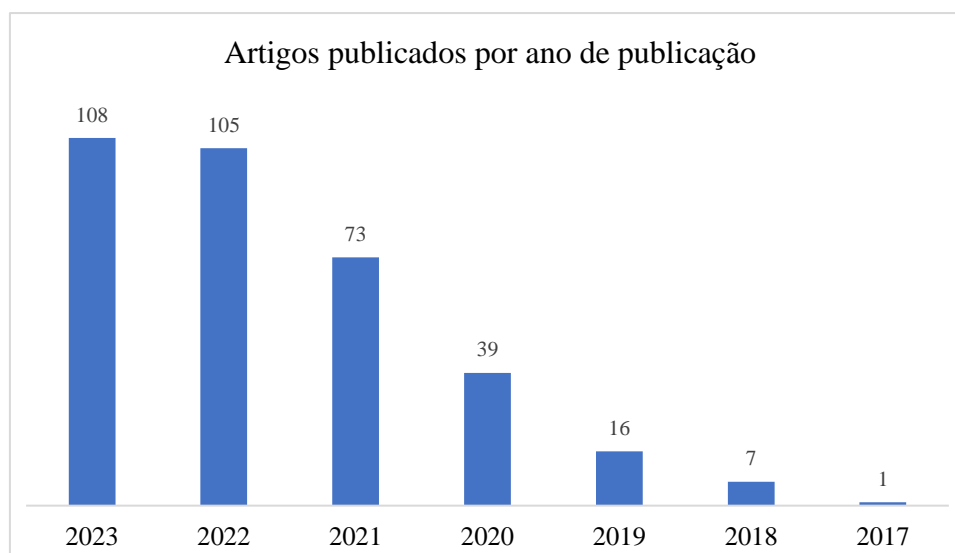
4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Foram analisados os 349 artigos com o objetivo de proporcionar uma visão abrangente do cenário das pesquisas sendo realizadas examinando a correlação entre a Economia Circular e a Indústria 4.0.

4.1.1 Quantidade de publicações ao longo do tempo

A Figura 9 mostra o número de artigos publicados ao longo dos anos, lembrando que para o ano de 2023 só constam publicações até o mês de outubro. A evolução no número de artigos publicados que abordam ambas as temáticas de Economia Circular e a Indústria 4.0 revela uma tendência crescente e significativa no interesse acadêmico e científico.

Figura 9 - Artigos publicados por ano de publicação



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Esse aumento expressivo pode ser atribuído ao reconhecimento da interconexão entre a Economia Circular e a Indústria 4.0. À medida que as tecnologias associadas à Indústria 4.0

ganham destaque, a aplicação desses avanços para promover práticas mais sustentáveis, alinhadas com os princípios da Economia Circular, torna-se uma área de pesquisa proeminente. Esse aumento pode refletir a crescente conscientização sobre a importância da integração entre a Indústria 4.0 e a Economia Circular, impulsionada por fatores como a busca por soluções mais sustentáveis e eficientes no contexto industrial.

A contínua ascensão nos anos seguintes, especialmente em 2023, com 108 artigos até outubro, sugere que essas temáticas permanecem no centro das discussões acadêmicas e científicas, podendo indicar um amadurecimento do campo, com pesquisadores explorando cada vez mais as implicações práticas, desafios e oportunidades associadas à convergência da Indústria 4.0 e Economia Circular.

4.1.2 Quantidade de publicações por país

A Tabela 2 a seguir mostra a distribuição do número de artigos por país, considerando apenas aqueles com ao menos 5 publicações.

Tabela 2 - Nº de artigos publicados por país

País	Nº de Artigos	País	Nº de Artigos
Reino Unido	81	Finlândia	10
Índia	79	Portugal	10
China	45	Marrocos	9
Itália	44	Singapura	9
França	34	Arábia Saudita	8
Brasil	27	Federação Russa	8
Espanha	26	Grécia	8
Malásia	26	Dinamarca	7
Estados Unidos	25	Emirados Árabes Unidos	7
Austrália	21	Lituânia	7
África do Sul	18	Noruega	7
Polônia	13	Ucrânia	7
Suécia	13	Hong Kong	6
Taiwan	13	Nova Zelândia	6
Turquia	12	Bangladesh	5
Alemanha	11	Catar	5
Indonésia	11	Sérvia	5
Paquistão	11	Vietnã	5
Canadá	10		

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Destacam-se o Reino Unido e a Índia, que lideram com 81 e 79 artigos, respectivamente. Esses países têm demonstrado um comprometimento considerável no desenvolvimento de uma Economia Circular, reconhecendo-a como uma estratégia crucial para promover a reciclagem eficiente de recursos e alcançar o desenvolvimento sustentável (Rogers; Deutz; Ramos, 2021, Molla *et al.*, 2022). Assim vemos que seria de grande interesse a essas nações o estudo do uso das tecnologias advindas da Indústria 4.0 alinhada a uma Economia Circular.

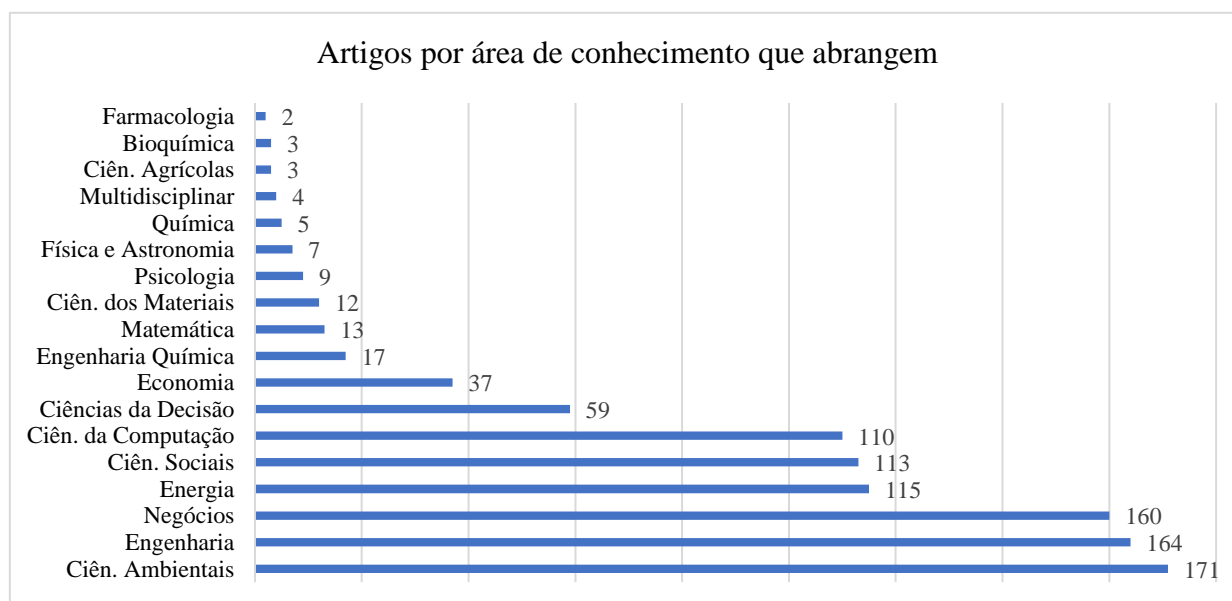
Além dos líderes destacados, observa-se uma participação significativa de diversas nações, como China, Itália, França e Brasil. Essa distribuição reflete a natureza global das temáticas em questão, com centros industriais e acadêmicos de diferentes regiões contribuindo para a pesquisa sobre as intersecções entre a Indústria 4.0 e a Economia Circular.

É notável a inclusão de países com menor representatividade, como Bangladesh, Catar, Sérvia e Vietnã, cada um com 5 artigos. Isso evidencia uma diversidade de perspectivas e um interesse disseminado, mesmo em economias emergentes, indicando que a pesquisa nessas áreas não está restrita apenas a países desenvolvidos. Além disso, a presença ativa de países como Malásia, Estados Unidos, Austrália e África do Sul sugere uma adesão global, destacando a importância dessas temáticas em diferentes contextos econômicos e geográficos.

4.1.3 Áreas de conhecimento mais predominantes

A Figura 10 abaixo mostra a distribuição dos artigos pelas áreas de conhecimento em que se enquadram considerando que um artigo pode abordar mais de uma área de conhecimento.

Figura 10 - Artigos por área de conhecimento que abrangem



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As Ciências Ambientais lideram com 171 artigos, refletindo a crescente preocupação global com a sustentabilidade e o impacto ambiental das práticas industriais. A interseção entre Indústria 4.0 e Economia Circular parece ser um ponto focal dentro desse campo, onde a inovação tecnológica se encontra com as necessidades ambientais. A Engenharia, com 164 artigos, destaca a importância da aplicação prática de tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 em processos industriais e o papel crucial da Engenharia na busca por eficiência e sustentabilidade.

A categoria de Negócios, com 160 artigos, indica o reconhecimento da relevância econômica dessas temáticas. Empresas e organizações buscam entender como a Indústria 4.0 pode ser integrada às práticas de Economia Circular para impulsionar inovações, eficiência operacional e competitividade. Outras áreas significativas incluem Energia (115 artigos) e Ciências Sociais (113 artigos), evidenciando a abordagem multidisciplinar adotada na pesquisa, que considera não apenas os aspectos técnicos, mas também os impactos sociais e energéticos dessas transformações.

Ciência da Computação (110 artigos) e Ciências da Decisão (59 artigos) indicam o papel fundamental da tecnologia e da análise de dados na implementação eficaz da Indústria 4.0, enquanto a presença de Economia (37 artigos) destaca a consideração das implicações econômicas associadas a essas mudanças.

Disciplinas como Engenharia Química, Matemática, Ciência dos Materiais, Psicologia, Física e Astronomia, Química, e outras, embora com números menores, mostram a diversidade de perspectivas e contribuições especializadas para a compreensão e implementação bem-sucedida desses conceitos.

4.1.4 Palavras chaves mais utilizadas

A Tabela 3 apresenta as principais palavras-chave utilizadas, dentre aquelas que foram usadas ao menos 10 vezes.

Tabela 3 - Palavras chaves mais utilizadas

(continua)

Palavra-chave	Quantidade	Palavra-chave	Quantidade
Indústria 4.0	271	Inteligência Artificial	15
Economia Circular	266	Revisão Sistemática da Literatura	14
Desenvolvimento Sustentável	107	Economia Ambiental	14
Sustentabilidade	89	Produção mais limpa	14
Manufatura	44	Manufatura Sustentável	13

(conclusão)

Palavra-chave	Quantidade	Palavra-chave	Quantidade
Economia Industrial	44	Tecnologias da Indústria 4.0	13
Cadeias de Suprimentos	43	Comércio	13
Tomada de Decisão	40	Produção Sustentável	12
Gestão da Cadeia de Suprimentos	35	Remanufatura	12
Gerenciamento de Resíduos	31	Controle de Poluição	12
Internet das Coisas	29	Indústria	12
Ciclo de Vida	28	Pesquisa Industrial	12
Reciclagem	24	Desenvolvimento Industrial	12
Artigo	24	Tecnologia Ambiental	12
Digitalização	22	Modelos de Negócios	12
Tecnologias Digitais	20	Negócios	12
Cadeias de Suprimentos Sustentáveis	18	Cadeia de Suprimentos	11
Humano	17	Design de Produto	11
Blockchain	17	Capacidades Dinâmicas	11
Revisão de Literatura	16	Análise de Dados	11
Aspecto Econômico	16	Estrutura Conceitual	11
Efeitos Econômicos e Sociais	16	Cadeia de Suprimentos Sustentável	10
Big Data	16	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável	10
Tecnologia	15	Manufatura Inteligente	10
Inovação	15	Análise de Ciclo de Vida	10
Tecnologia Industrial	15	Gestão Ambiental	10
Impacto Ambiental	15	Digitalização	10
Transformação Digital	15		

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A análise das palavras sugere que os pesquisadores e profissionais estão explorando ativamente como a convergência entre Indústria 4.0 e Economia Circular pode resultar em práticas industriais mais sustentáveis, incorporando tecnologias avançadas, abordagens inovadoras de cadeia de suprimentos e modelos de negócios alinhados com objetivos sustentáveis.

- **Sustentabilidade:** “Sustentabilidade” e “Desenvolvimento Sustentável” aparecem frequentemente, enfatizando importância de abordagens que equilibram aspectos econômicos, sociais e ambientais. Além disso termos como “Economia Ambiental”, “Produção mais Limpa”, “Reciclagem”, “Controle de Poluição”, entre outros, refletem uma consciência ambiental na interseção da Indústria 4.0 e Economia Circular.
- **Tecnologias e Inovação:** “Internet das Coisas”, “Tecnologias Digitais”, “Inteligência Artificial”, “Blockchain”, “Big Data”, “Digitalização”, entre outras, mostram a forte ligação entre inovação tecnológica e práticas sustentáveis, indicando que a aplicação de tecnologias avançadas é essencial para alcançar esses objetivos.

- Cadeias de Suprimentos Sustentáveis: “Cadeias de Suprimentos Sustentáveis” e “Gestão da Cadeia de Suprimentos” destacam a importância de uma abordagem holística, desde a produção até a distribuição e posterior retorno, para garantir práticas sustentáveis em toda a cadeia produtiva.
- Revisão Sistemática e Pesquisa Industrial: A presença de “Revisão Sistemática da Literatura” e “Pesquisa Industrial” indica um esforço acadêmico para compreender e consolidar o conhecimento nessas áreas.
- Modelos de Negócios Sustentáveis: “Modelos de Negócios” e “Negócios” sugerem uma abordagem estratégica para incorporar práticas sustentáveis nos modelos de negócios, mostrando que a sustentabilidade não é apenas uma preocupação operacional, mas também uma oportunidade de inovação nos negócios.

4.2 ANÁLISE QUALITATIVA

O Quadro 4 abaixo apresenta o número e o nome dos 21 artigos usados na realização da análise qualitativa, além de seus autores e uma descrição resumida do objetivo.

Quadro 4 - Artigos utilizados na análise qualitativa

(continua)

Nº	Artigo	Autor	Objetivo
1	Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations	Jabbour <i>et al.</i> (2018)	Apresentar uma agenda de pesquisa e um roteiro para integrar a Indústria 4.0 e a Economia Circular, visando aprimorar a tomada de decisões em gestão de operações sustentáveis.
2	Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review	Rosa <i>et al.</i> (2019)	Destacar as conexões entre os conceitos de Economia Circular e Indústria 4.0, identificar áreas comuns e criar um novo framework para orientar futuras pesquisas.
3	Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0	Esmaeilian <i>et al.</i> (2020)	Como a tecnologia Blockchain e a Indústria 4.0 impulsionam as cadeias de suprimentos em direção à sustentabilidade.
4	A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy	Yadav <i>et al.</i> (2020)	Desenvolver um modelo para superar os desafios da Gestão Sustentável da Cadeia de Suprimentos na indústria automotiva por meio de soluções baseadas na Indústria 4.0 e Economia Circular.

(continua)

Nº	Artigo	Autor	Objetivo
5	Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies	Bressanelli <i>et al.</i> (2018)	Explorar como as tecnologias digitais possibilitam a transição para uma Economia Circular em modelos de negócios centrados no consumo.
6	Connecting circular economy and industry 4.0	Rajput e Singh (2019)	Compreender a conexão subjacente entre a Economia Circular e a Indústria 4.0 no âmbito da cadeia de suprimentos.
7	Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities	Bag <i>et al.</i> (2021)	Explorar como as forças institucionais moldam recursos e habilidades no desenvolvimento de uma Inteligência Artificial alimentada por análise de Big Data, e seu impacto nas práticas sustentáveis.
8	The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies	Kristoffersen <i>e t al.</i> (2020)	Criar uma orientação sistemática sobre como as tecnologias digitais podem ser aplicadas para capturar todo o potencial de estratégias circulares.
9	Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals	Fatimah <i>et al.</i> (2020)	Investigar questões fundamentais e oportunidades na gestão de resíduos, visando desenvolver um sistema sustentável e inteligente de gestão de resíduos em nível nacional utilizando tecnologias da Indústria 4.0.
10	Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development	Bag, Gupta e Kumar (2021)	Investigar se as tecnologias da Indústria 4.0 podem impulsionadoras das capacidades avançadas de manufatura baseadas nos 10Rs, visando alcançar o desenvolvimento sustentável.
11	Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance	Dev, Shankar e Qaiser (2020)	Propor um roteiro para a excelência das operações na cadeia de suprimentos/logística reversa sustentável, integrando os princípios da Indústria 4.0 com abordagens de Economia Circular
12	Blockchain and the circular economy	Kouhizadeh, Zhu e Sarkis (2019)	Analisar como a tecnologia Blockchain tem o potencial de transformar e impulsionar a concretização da Economia Circular.
13	Blockchain technology and the circular economy	Upadhyay <i>et al.</i> (2021)	Fazer uma revisão crítica da contribuição atual e potencial da tecnologia Blockchain para a Economia Circular

(conclusão)

Nº	Artigo	Autor	Objetivo
14	Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations	Kumar, Singh e Dwivedi (2020)	Analisar os desafios enfrentados por pequenas e médias empresas na implementação de tecnologias da Indústria 4.0 para operações éticas e sustentáveis.
15	Industry 4.0 and the circular economy: A literature review and recommendations for future research	Awan, Sroufe e Shahbaz (2021)	Realizar uma revisão de literatura sobre a relação entre a Indústria 4.0 e a Economia Circular, com ênfase nos interesses e expectativas dos stakeholders em relação ao uso da Internet das Coisas na gestão da economia circular.
16	Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy	Bag <i>et al.</i> (2021)	Desenvolver um modelo teórico que relaciona recursos-chave para a adoção da Indústria 4.0 com capacidades de produção sustentável e a Economia Circular
17	Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy	Bag <i>et al.</i> (2020)	Identificar a relação entre Procurement 4.0 e transformações digitais, avaliando como a transformação digital impacta a intenção de otimizar o processo de aquisição na Economia Circular.
18	Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers	Kumar, Singh e Kumar (2021)	Analisar as barreiras para alcançar a sustentabilidade nas operações da cadeia de suprimentos na era da Indústria 4.0 e da Economia Circular.
19	To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP	Kumar <i>et al.</i> (2021)	Identificar e priorizar as barreiras à adoção da Indústria 4.0 e Economia Circular na cadeia de suprimentos agrícolas na Índia
20	Sustainable industrial and operation engineering trends and challenges Toward Industry 4.0: a data driven analysis	Tseng <i>et al.</i> (2021)	Fornecer uma revisão bibliométrica sobre engenharia industrial e operacional sustentável no contexto da Indústria 4.0,
21	Industry 4.0, cleaner production and circular economy:	Gupta, Kumar e Wasan (2021)	Propor um modelo integrador para avaliar o desempenho ético e sustentável de organizações industriais, fundamentado nos conceitos de economia circular, produção sustentável mais limpa e padrões da Indústria 4.0.

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Os artigos fornecem uma visão abrangente sobre a interseção entre a Indústria 4.0 e a Economia Circular, abordando diversas perspectivas e desafios. Abaixo está uma análise geral dos principais temas abordados nos artigos:

- **Integração da Indústria 4.0 e Economia Circular:** vários artigos (1, 2, 6, 11, 21) destacam a importância de integrar a Indústria 4.0 e a Economia Circular para melhorar a sustentabilidade nas operações industriais. Há uma ênfase na criação de *frameworks* e *roadmaps* para orientar a implementação conjunta desses conceitos.
- **Tecnologias Facilitadoras:** a tecnologia Blockchain é explorada em diversos artigos (3, 12, 13) como uma tecnologia-chave para impulsionar a sustentabilidade nas cadeias de suprimentos, especialmente na gestão de resíduos e na concretização da Economia Circular. O papel das tecnologias digitais, como Internet das Coisas e análise de Big Data, também é discutido em relação ao avanço da Indústria 4.0 e à promoção de práticas sustentáveis (5, 7, 8, 15).
- **Sustentabilidade na Cadeia de Suprimentos:** vários artigos (4, 11, 16, 17, 18, 19) abordam questões relacionadas à gestão sustentável da cadeia de suprimentos na era da Indústria 4.0 e da Economia Circular. São propostas soluções para superar desafios específicos na cadeia de suprimentos, como aqueles relacionados à indústria automotiva (4) e à aquisição de materiais (17).
- **Aplicações Setoriais e Regionais:** alguns artigos exploram aplicações específicas em setores como pequenas e médias empresas (14), agricultura (19), e analisam a situação na Índia (19). Isso destaca a diversidade de desafios e oportunidades associados à implementação da Indústria 4.0 e Economia Circular em diferentes contextos.
- **Avaliação de Desempenho Ético e Sustentável:** artigos como o número 21 propõem frameworks para avaliar o desempenho ético e sustentável de organizações industriais, unindo conceitos de economia circular, produção sustentável e padrões da Indústria 4.0.
- **Desafios e Barreiras:** Há uma análise consistente das barreiras à adoção da Indústria 4.0 e Economia Circular, incluindo questões tecnológicas, institucionais e setoriais; principalmente visto nos artigos 14, 18 e 19.

Os artigos coletivamente fornecem uma base sólida para entender a interconexão entre a Indústria 4.0 e a Economia Circular, destacando oportunidades, desafios e caminhos para a implementação bem-sucedida desses conceitos para operações sustentáveis. A abordagem multidisciplinar, que incorpora aspectos tecnológicos, setoriais e regionais, contribui para uma compreensão abrangente desse cenário em evolução.

4.2.1 Tecnologias da Indústria 4.0 que impulsionam a Economia Circular

A Tabela 4 a seguir reúne as tecnologias da Indústria 4.0 descritas por artigo como aliadas da Economia Circular.

Tabela 4 - Tecnologias da Indústria 4.0 descritas por artigo como aliadas da Economia Circular

Nº do artigo	Tecnologia da Indústria 4.0					
	Big Data	Blockchain	Internet das Coisas	Manufatura aditiva	Nuvem	Simulação
1			X	X	X	
2	X		X	X	X	X
3		X	X		X	
4			X		X	
5	X		X		X	
6	X		X		X	
7	X					
8	X		X		X	
9	X		X		X	
10						
11			X		X	X
12		X				
13		X				
14	X		X	X	X	
15	X		X		X	
16	X					
17	X		X		X	
18						
19						
20	X		X		X	
21	X		X	X	X	
Total	12	3	14	4	14	2

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Várias tecnologias emergem como elementos-chave nesse contexto, oferecendo suporte à transição para práticas mais sustentáveis e eficientes. As seguintes seções detalham como essas tecnologias da Indústria 4.0 contribuem para a implementação de uma Economia Circular.

4.2.1.1 Internet das Coisas, Nuvem e Big Data

A tecnologia da Internet das Coisas, Nuvem e Big Data tem desempenhado um papel crucial na interseção entre a Indústria 4.0 e a Economia Circular, conforme evidenciado pela análise de 21 artigos. Dentre esses, 14 abordaram de maneira conjunta a Internet das Coisas e a Nuvem e 12 ambos e o Big Data.

A relação intrínseca entre a Internet das Coisas, o Big Data e a Nuvem residem na necessidade de processar e analisar os dados gerados pelos dispositivos conectados. A Nuvem, com sua capacidade de armazenamento e processamento escalável, desempenha um papel fundamental nesse cenário. Ela permite que as empresas realizem análises em larga escala, extraíndo insights significativos para otimizar operações e promover a transição para uma economia mais circular. Além disso, a Nuvem desempenha um papel crucial ao permitir o acesso em tempo real a dados e recursos de diversos locais. Isso se alinha perfeitamente à natureza da Internet das Coisas, que opera em tempo real, fornecendo informações em tempo hábil sobre condições, status, localização e uso dos produtos.

A combinação dessas tecnologias não apenas impulsiona a eficiência operacional, mas também possibilita a tomada de decisões mais informadas, promovendo a sustentabilidade e a gestão responsável dos recursos (Rajput; Singh, 2019; Awan; Sroufe; Shahbaz, 2021; Bag et al, 2021; Tseng et al., 2021).

No contexto do design de produtos, a coleta de dados de uso, possibilitada pela Internet das Coisas, permite que as empresas otimizem seus produtos para atender melhor às demandas dos clientes. Isso inclui a capacidade de redesenhar produtos para facilitar manutenção, atualização, desmontagem e reciclagem, contribuindo assim para a sustentabilidade e prolongamento da vida útil dos produtos.

No âmbito do marketing, a análise dos dados provenientes da base instalada, graças à Internet das Coisas, oferece informações valiosas sobre como os clientes estão utilizando os produtos. Essa inteligência de mercado possibilita a elaboração de estratégias de marketing mais eficazes, visando atrair novos clientes específicos interessados na oferta de economia circular em detrimento das opções tradicionais.

A monitorização constante das condições, status, localização e uso dos produtos por meio da Internet das Coisas, suportada pela Nuvem, desencoraja comportamentos negligentes por parte dos usuários. Essa vigilância não apenas estende a vida útil dos produtos, mas também abre espaço para modelos de negócios compartilhados, nos quais as informações sobre a condição e o uso do produto são compartilhadas entre vários usuários. O compartilhamento, por

sua vez, aumenta a utilização do produto, contribuindo para uma melhoria na eficiência dos recursos.

Aprimorar a prestação de serviços técnicos e de suporte, como reparo, assistência e gestão de peças de reposição, torna-se possível para empresas e sua rede de assistência técnica por meio da análise de Big Data. A realização de análises apropriadas implica na oferta de manutenção preventiva e preditiva, significando uma extensão na vida útil do produto. Adicionalmente, as empresas têm a possibilidade de oferecer aos clientes conselhos personalizados visando otimizar a fase de uso dos seus produtos.

Assim, a implementação eficiente da Internet das Coisas alinhada à análise de Big Data, suportada pela Nuvem, não apenas aprimora o design de produtos para atender melhor às demandas dos clientes, mas também revoluciona as estratégias de marketing e promove a sustentabilidade por meio do prolongamento da vida útil dos produtos e da introdução de modelos de negócios compartilhados.

4.2.1.2 Blockchain

A tecnologia Blockchain pode ser definida como um registro distribuído online e de código aberto, no qual transações entre diferentes partes interessadas podem ser registradas e atualizadas simultaneamente e em tempo real. A Blockchain é projetada para que esses registros de transações possam ser autenticados de maneira confiável e se tornem irreversíveis. Este sistema *peer-to-peer* despreza o papel e o poder do controle centralizado sobre transações, registro e acesso a esses registros. Além disso, a Blockchain tem o potencial de sustentar e trazer segurança para um dos pilares da Indústria 4.0, que é a Internet das Coisas. Ele também pode facilitar a automação de transações de maneira permanente e verificável contribuindo para economia de tempo e recursos, eliminando ineficiências e desperdícios (Upadhyay *et al.*, 2021).

Na questão de sustentabilidade a Blockchain oferece quatro capacidades principais que beneficiam as cadeias de suprimentos sustentáveis. Primeiro, ela reduz *recalls* e retrabalhos por meio de suas capacidades de rastreamento. Em segundo lugar, facilita a determinação precisa da pegada de carbono e o cálculo do imposto de carbono devido por cada empresa. Terceiro, incentiva o comportamento de reciclagem por meio de programas com base em depósitos. Por último, melhora a eficiência dos esquemas de comércio de emissões, reduzindo fraudes e melhorando a fidelidade do sistema (Esmailian *et al.*, 2020)

A oferta de moedas ou tokens pode ser utilizada como um mecanismo para financiar comportamentos relacionados à sustentabilidade. Tokens locais em plataformas digitais podem ser projetados para promover comportamentos sustentáveis durante toda a vida útil do produto. Esses tokens servem como meio de troca quando os usuários acessam serviços nas plataformas digitais oferecidos por empresas ou iniciativas, incentivando práticas ecológicas.

Além disso, a natureza distribuída e descentralizada da Blockchain não se limita a reduzir a necessidade de autoridades centrais e mediadores. Sua natureza imutável e de proteção de identidade oferece oportunidades para diferentes nós da rede registrar, usar e verificar informações em um livro público, mantendo suas identidades protegidas. Isso permite que fabricantes monitorem produtos ao longo de seu ciclo de vida, coletando dados necessários para melhorar design, fabricação, venda, uso e recuperação.

A Blockchain pode desempenhar um papel fundamental na promoção da sustentabilidade na Economia Circular, oferecendo soluções inovadoras. Suas capacidades têm o potencial de transformar a maneira como as empresas abordam a sustentabilidade, promovendo a integração de princípios sustentáveis em seus modelos de negócios e fechando os ciclos de vida dos produtos de maneira transparente e rastreável.

4.2.1.3 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia revolucionária na sociedade contemporânea, destacando-se como um dos métodos mais inovadores de produção. Sua importância é ampliada quando consideramos as inter-relações entre a Manufatura Aditiva e a Economia Circular, um conceito que visa minimizar o desperdício e promover a reutilização de recursos. A Manufatura Aditiva contribui para a gestão do ciclo de vida de produtos e processos, como descrito por diversos estudiosos (Rosa *et al.*, 2019, Kumar; Singh; Dwivedi, 2020, Gupta; Kumar; Wasan, 2021)

Ao compararmos os métodos tradicionais de manufatura, que envolvem usinagem e corte de materiais, com a Manufatura Aditiva, observamos uma mudança significativa no paradigma. Os métodos convencionais frequentemente resultam em grande desperdício de material, que muitas vezes não é recuperado para reutilização. Por outro lado, a Manufatura Aditiva elimina praticamente o desperdício de matéria-prima. Essa abordagem não apenas contribui para a Economia Circular, mas também destaca a flexibilidade e consistência dessa tecnologia capaz de produzir designs intrincados de maneira fácil, facilitar testes e providenciar prototipagens de forma precisa e acessível para pequenas e médias empresas.

A conexão entre Manufatura Aditiva e Economia Circular é evidente na redução significativa de desperdícios, na promoção de práticas sustentáveis e na criação de um ambiente de fabricação mais ético e eficiente. Essa abordagem inovadora não apenas transforma os métodos tradicionais de produção, mas também impulsiona o desenvolvimento de negócios de maneira ética e sustentável.

4.2.1.4 Simulação

Diversos estudos abordam os efeitos das simulações nos modelos de negócios circulares e na gestão do ciclo de vida do produto. Alguns identificam maneiras específicas pelas quais a simulação pode apoiar a Economia Circular.

Uma abordagem é a otimização do desempenho da cadeia de suprimentos, por exemplo, por meio de redes neurais probabilísticas (Rosa *et al.*, 2019, apud He; Xu; Xu, 2010). Outra possibilidade é o modelamento dos fluxos de materiais. Além disso, a Simulação pode ser explorada para apoiar a remanufatura de produtos, por meio de ferramentas de suporte à decisão (Rosa *et al.*, 2019, apud Kuik; Kaihara; Fujii, 2016).

A Simulação também demonstra sua eficácia na melhoria da eficiência na exploração de recursos naturais (Rosa *et al.*, 2019, apud Rönnlund *et al.* 2016). Além disso, ela possibilita o desenvolvimento de novos serviços, especialmente para fins de manutenção (Rosa *et al.*, 2019, apud Ashjaei e Bengtsson 2017). Embora em casos isolados, especialistas associam a Simulação como uma ferramenta de apoio à reciclagem (Rosa *et al.*, 2019, apud van Schaik e Reuter 2016).

Ao incorporar a simulação na Indústria 4.0, as empresas podem visualizar e analisar todo o ecossistema de produção, identificando pontos de melhoria na eficiência energética, redução de resíduos e otimização do uso de matérias primas. Isso alinha-se diretamente com os princípios da Economia Circular, onde o objetivo é criar um ciclo sustentável em que os recursos são continuamente reutilizados.

Além disso, a simulação na Indústria 4.0 pode ser aplicada para projetar produtos com uma abordagem circular desde a concepção. Modelos virtuais podem simular o ciclo de vida do produto, permitindo a incorporação de design para desmontagem, facilitando a recuperação de materiais e a reciclagem. Essa integração entre simulação e Economia Circular contribui para a criação de sistemas de produção mais sustentáveis e resilientes.

A Simulação oferece ferramentas poderosas para otimizar processos industriais e tomar decisões informadas. Quando combinada com os princípios da Economia Circular, essa

tecnologia não apenas impulsiona a eficiência operacional, mas também promove práticas industriais mais sustentáveis e alinhadas com a preservação do meio ambiente. Essa sinergia entre a simulação e a Economia Circular é essencial para enfrentar os desafios contemporâneos de sustentabilidade e desenvolvimento econômico

4.2.2 Rumo a uma Economia Circular alinhada à Indústria 4.0

Apesar de possuírem conceitos, origens e fundamentos distintos, a "Indústria 4.0" e a "Economia Circular" estão interligadas, sendo que a primeira pode ser vista como uma facilitadora para a implementação da segunda, e vice-versa. É intrigante observar que a digitalização impulsionada pela "Indústria 4.0" é um objetivo claro para as indústrias, ao passo que a adoção da "Economia Circular" ainda representa uma mudança paradigmática desafiadora para muitos (Teixeira, 2021).

Vivenciamos atualmente uma complexa interseção de fatores sociais, econômicos, políticos e ambientais, que impulsionam uma transição significativa nos processos de manufatura. A par disso, observamos descobertas tecnológicas transformadoras, enfrentamos os desafios das mudanças climáticas e respondemos às crescentes demandas para garantir uma qualidade de vida sustentável. Esse cenário levou a uma evolução do pensamento em relação ao ecossistema, culminando no, recentemente popularizado, conceito da "Economia Circular". Nesse contexto, os avanços tecnológicos que nos conduziram ao universo digital emergente desempenham um papel crucial, moldando novos modelos de negócios que se alinham com as demandas contemporâneas.

A implementação de práticas de Economia Circular na Indústria 4.0 é principalmente influenciada pelo interesse dos *stakeholders* (todas as partes interessadas). Se não houver expectativa por parte dos *stakeholders*, qualquer implementação provavelmente deixará de existir (Yadav *et al.*, 2020). No entanto a formulação de estratégias e de atividades de cocriação de valor para a implementação de práticas de Economia Circular são complexas, pois envolvem diversos *stakeholders* em diferentes estágios da cadeia de suprimentos. Essa visão é também respaldada por Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016), que sugeriram que as práticas de Economia Circular estão em constante evolução. As empresas precisam considerar os interesses dos *stakeholders* em todas as fases. Dessa forma, a gestão das expectativas é fundamental, se as empresas adquirirem novos recursos e aplicarem conhecimento à produção para desenvolver produtos usando práticas de Economia Circular, terão mais sucesso em reduzir o impacto ambiental, diminuir os custos e promover novas oportunidades de emprego.

A demanda dos clientes por produtos sustentáveis está continuamente aumentando e se tornará mais forte no futuro. A demanda dos mercados finais é o principal gatilho para a transformação digital e de negócios (Jabbour *et al.*,2018). Toda empresa faz parte da cadeia de suprimentos, e os compradores podem pressionar as empresas a cumprirem os padrões ambientais internacionais e a se submeterem à avaliação de certificação de terceiros em relação as suas práticas de Economia Circular.

Em relação as instituições, Awan, Sroufe e Shahbaz (2021), apontam os seguintes interesses como centrais.

Preocupações:

- Utilizar a Internet das Coisas para auxiliar na manutenção pode gerar mais impostos sobre o material reutilizado.
- Aprimorar a gestão de resíduos.
- Tomar decisões mais assertivas sobre o apoio financeiro à indústria para reutilização e desenvolvimento de uma cadeia de abastecimento resiliente.
- Gerenciar e avaliar informações em tempo real sobre geração de resíduos, reciclagem, reutilização, recuperação e remanufatura.
- Monitorar padrões de consumo de energia, resíduos e água e desencorajar o descarte ilegal de resíduos.
- Fortalecer relacionamentos industriais com diferentes agentes para aprimorar soluções de recuperação.

Expectativas:

- As tecnologias de Manufatura Inteligente da Indústria 4.0 (implementação de realidade virtual e realidade aumentada) serão essenciais para tornar as indústrias mais sustentáveis.
- Garantir acesso global a produtos acessíveis para todos.
- Alcançar um alto nível de estabilidade econômica e produtividade.
- Mobilizar pequenas empresas para possibilitar tecnologias inteligentes e obter materiais localmente quando apropriado.

Estratégias:

- Incentivar o *e-procurement* e fornecer mais suporte para construir infraestrutura que sustente a Economia Circular (reutilização, remanufatura, recuperação e reciclagem).
- Estabelecer programas de marketing promocional para sistemas de produto/serviço.

- Fornecer iniciativas de apoio financeiro e investimentos para a digitalização da indústria na Economia Circular.
- Apoiar pesquisas para o desenvolvimento de abordagens de aprendizado de máquina e uso de inteligência artificial.
- Desenvolver regulamentações mais eficientes para parcerias público-privadas e redes globais reversas.

A transformação do modelo linear para o Circular implica uma mudança fundamental no *mindset*. O escopo não deve mais se limitar ao processo em si, mas sim abranger todo o ecossistema. A ênfase na eficiência precisa evoluir para a efetividade, pois a eficiência está associada à execução competente de uma tarefa, enquanto a efetividade diz respeito à capacidade de gerar e manter um impacto, preferencialmente positivo. A proposta de valor, que inicialmente visava apenas a redução de custos, agora deve ser expandida para incluir a criação de valor. Em vez de se concentrar exclusivamente nos lucros, é crucial direcionar o foco para a inovação e os novos valores. A ética da competição deve ser deixada de lado em favor da ética da colaboração. O papel tradicional de consumidor deve ser transformado no papel mais abrangente de usuário. Além disso, é necessário ampliar a perspectiva de visão de curto prazo para uma visão de longo prazo, reconhecendo que as mudanças sustentáveis muitas vezes exigem uma abordagem mais abrangente e duradoura (Teixeira, 2021).

Na esfera dos modelos de negócios, um exemplo amplamente reconhecido é a prática compartilhada de bicicletas e patinetes, evidenciando a integração da tecnologia em um cenário de "Economia Circular". Nesse contexto, o acesso ao produto é simplificado por meio de um aplicativo de aluguel no celular. Essa abordagem inovadora pode ser expandida para diversos equipamentos, visando a otimização desse modelo. A transformação na utilização de produtos e serviços não apenas reflete uma mudança nos modelos de negócios, mas também revela uma evolução no comportamento do consumidor, que agora pode usufruir sem necessariamente possuir.

A adaptação do consumidor a essa mudança não é trivial, demandando uma reconfiguração na relação construída ao longo de sua experiência de consumo. Enquanto a posse tradicionalmente gera apegos, o compartilhamento elimina essa dinâmica.

A abordagem de compartilhamento de produtos e serviços deve se estender também às empresas, oferecendo opções de aluguel ou contratação por tempo determinado. Essa prática não só beneficia as empresas, reduzindo a necessidade de investimentos volumosos, mas também contribui para a eficiência do modelo.

A adaptação às mudanças não se restringe à produção, sendo essencial que as empresas ampliem a oferta de serviços em detrimento dos produtos. Ao adotar essa abordagem, as empresas podem alcançar um maior número de consumidores interessados no mesmo produto, resultando na redução de desperdício e custos.

Além disso, a formação profissional deve ser ajustada para capacitar os indivíduos a lidar com as novas tecnologias e métodos de trabalho. Paralelamente, as empresas devem se preparar, compreendendo as tecnologias disponíveis e adotando práticas que possam implicar em mudanças culturais. Tanto profissionais quanto empresas precisam se adaptar aos novos padrões de atuação e à crescente competitividade no mercado de trabalho.

Em seus trabalhos, Kumar, Singh e Kumar (2021) e Kumar *et al.* (2021) identificaram as principais barreiras para implementação de uma Economia Circular alinhada a Indústria 4.0. As barreiras comuns encontradas por eles foram:

1. Falta de Conscientização:

- A falta de compreensão sobre a importância da Indústria 4.0 e dos princípios da Economia Circular é generalizada. Muitas organizações desconhecem os benefícios potenciais dessas abordagens, resultando em uma falta de motivação para a mudança.

2. Falta de Apoio Governamental:

- A ausência de incentivos, subsídios financeiros e programas de treinamento do governo cria barreiras significativas para a adoção de práticas sustentáveis na cadeia de suprimentos. A falta de suporte governamental impacta diretamente os custos de adoção e a capacidade das organizações de implementar mudanças.

3. Resistência dos Funcionários à Mudança:

- A automação associada à Indústria 4.0 gera resistência entre os funcionários, principalmente devido ao medo de perda de empregos e à eliminação de atividades manuais. Essa resistência pode atrasar a implementação efetiva de práticas sustentáveis.

4. Falta de Suporte de Gestão:

- A falta de visão, financiamento e relutância da alta administração em apoiar atividades para operações sustentáveis cria uma barreira substancial. A gestão muitas vezes prioriza metas de curto prazo em detrimento de investimentos necessários para a transição para a Economia Circular.

5. Falta de Demanda de Mercado:

- Devido aos custos mais elevados associados à produção de produtos sustentáveis, a falta de demanda de mercado representa um desafio. As organizações hesitam em investir em práticas sustentáveis sem uma demanda substancial do mercado.

6. Falta de Estratégia para Integração da Indústria 4.0 e Economia Circular:

- A falta de uma estratégia bem definida para integrar efetivamente a Indústria 4.0 e os princípios da Economia Circular cria obstáculos. A ausência de uma abordagem clara dificulta a compreensão da implementação e os benefícios potenciais.

Lidar com as barreiras para operações sustentáveis requer abordagens integradas e estratégias cuidadosamente planejadas. Aqui estão algumas sugestões para superá-las:

1. Conscientização e Educação:

- Desenvolver programas de conscientização e treinamento para todos os níveis da organização, destacando os benefícios da Indústria 4.0 e da Economia Circular.
- Fornecer informações claras sobre os impactos positivos nas operações, na eficiência e na sustentabilidade.

2. Engajamento Governamental:

- Advocar por políticas governamentais favoráveis, como incentivos fiscais, subsídios e regulamentações que promovam práticas sustentáveis.
- Participar de iniciativas colaborativas entre empresas e governos para promover uma transição suave para a sustentabilidade na cadeia de suprimentos.

3. Gestão de Mudanças Efetiva:

- Implementar estratégias de gestão de mudanças que abordem as preocupações dos funcionários, como programas de treinamento, comunicação transparente e participação ativa.
- Demonstrar os benefícios sociais e econômicos da mudança, destacando o desenvolvimento de novas habilidades e oportunidades de emprego.

4. Comprometimento da Alta Administração:

- Envolver a alta administração no desenvolvimento e implementação de estratégias sustentáveis.
- Estabelecer metas de sustentabilidade alinhadas com os objetivos de longo prazo da empresa e integrá-las às estratégias corporativas.

5. Incentivos Financeiros:

- Buscar financiamentos e parcerias público-privadas para apoiar investimentos em tecnologias sustentáveis.
- Criar modelos de negócios inovadores que integrem práticas sustentáveis e demonstrem retornos financeiros a curto e longo prazo.

6. Desenvolvimento de Mercado:

- Investir em estratégias de marketing para educar os consumidores sobre produtos sustentáveis, criando uma demanda mais robusta no mercado.
- Colaborar com outros players da cadeia de suprimentos para promover a sustentabilidade em toda a cadeia, criando um ambiente propício para práticas mais ecológicas.

7. Estratégia de Integração Tecnológica:

- Desenvolver uma estratégia clara para a integração da Indústria 4.0, incluindo avaliação de tecnologias relevantes, investimentos em infraestrutura digital e capacitação da força de trabalho.
- Colaborar com fornecedores e parceiros para garantir uma cadeia de suprimentos digitalmente integrada.

8. Colaboração e Redes de Parceria:

- Colaborar com outras empresas, organizações e partes interessadas para compartilhar melhores práticas e desenvolver soluções conjuntas.
- Participar de iniciativas setoriais e redes de colaboração para promover a sustentabilidade em toda a indústria.

Ao abordar essas barreiras de maneira abrangente, as organizações podem criar um ambiente propício para a implementação bem-sucedida de uma Economia Circular alinhada a Indústria 4.0. Isso não apenas fortalece a resiliência da organização, mas também contribui para a construção de uma economia mais sustentável e responsável.

4.2.3 Estudo de casos

A seguir será apresentado casos de implementação de características da Economia Circular alinhada as tecnologias da Indústria 4.0.

4.2.3.1 Alpha

Alpha é uma varejista de eletrodomésticos que atua no Norte da Europa. Seu foco está em fornecer lavadoras, lava-louças e secadoras, adotando um modelo de negócios baseado em serviços. Em vez de vender aparelhos diretamente às residências, a empresa oferece contratos (assinaturas) que conferem aos clientes o direito de acesso e uso do eletrodoméstico por meio de um esquema de pagamento mensal ou pagamento por uso. Além da oferta de assinatura tradicional, a empresa iniciou recentemente seu primeiro projeto-piloto de "lavanderia compartilhada" para testar a viabilidade do compartilhamento de eletrodomésticos entre residências. O projeto-piloto envolveu cerca de 100 usuários que concordaram em compartilhar lavadoras e lavadoras-secadoras. Dessa forma, a empresa adota três opções diferentes de modelo de negócios baseado em serviços: (i) uma solução de pagamento mensal; (ii) uma solução de pagamento por uso; e (iii) uma solução de compartilhamento (Bressanelli *et al.* 2018).

Fundada em 2014, a empresa conta com menos de 10 funcionários. Até 2016, a Alpha alcançou uma base instalada de mais de 1000 produtos, gerando um faturamento de cerca de €0,5 milhão. A Alpha gera valor para o cliente através da redução do investimento inicial necessário para ter acesso ao eletrodoméstico. De fato, os custos de aquisição, transporte e instalação estão incluídos na taxa. Assim, os usuários podem ter acesso a um eletrodoméstico altamente eficiente diretamente em suas casas, sem ter que pagar o preço inicial, que é tipicamente alto. Além disso, uma vez que o custo de uso afeta mais de 60% do custo total de propriedade de máquinas de lavar, a Alpha consegue garantir um custo total mais baixo para seus clientes, oferecendo eletrodomésticos caracterizados por baixo consumo de energia e consumíveis (Bressanelli *et al.* 2018).

Uma vez que em modelos de negócios focados no uso, a empresa geralmente é responsável por todos os custos do ciclo de vida do produto, os produtos podem ser projetados para a Economia Circular. No entanto, a Alpha não executa a fase de design dos eletrodomésticos internamente, dada sua função de varejista. Pelo contrário, a empresa conta com uma parceria com um fabricante de eletrodomésticos de alta qualidade, que fornece produtos altamente eficientes. Além disso, uma rede capaz de realizar suporte em campo (por exemplo, transporte, reparo, manutenção, atualização, coleta, etc.) é um requisito para uma entrega bem-sucedida da oferta da empresa. Assim como no caso do design, a Alpha não realiza essas atividades internamente, mas pode contar com uma forte relação com um provedor de serviços logísticos e técnicos (Bressanelli *et al.* 2018).

Quando os usuários encerram a assinatura, o eletrodoméstico é recolhido pela empresa. Uma verificação completa de desempenho é executada e, após isso, a Alpha fornece o eletrodoméstico a um novo usuário, dentro de uma nova assinatura. Quando os eletrodomésticos se tornam tecnologicamente obsoletos, eles são recolhidos e substituídos; os eletrodomésticos antigos são reparados, reformados e limpos. Quando se tornam ineficientes em termos de energia, são enviados para mercados secundários, como países em desenvolvimento (Bressanelli *et al.* 2018).

A Alpha demonstra uma integração eficaz da Economia Circular com a Indústria 4.0 por meio de seu inovador modelo de negócios baseado em serviços para eletrodomésticos. Ao oferecer contratos de assinatura que abrangem opções de pagamento mensal, pagamento por uso e até mesmo um projeto-piloto de "lavanderia compartilhada", a empresa promove a maximização do ciclo de vida útil dos produtos. A ênfase na assinatura e no compartilhamento estimula a eficiência e a sustentabilidade, reduzindo o investimento inicial para os clientes e garantindo a utilização otimizada dos eletrodomésticos. A parceria estratégica com um fabricante de alta qualidade e um provedor de serviços logísticos e técnicos evidencia a abordagem colaborativa da Alpha na implementação da Indústria 4.0. Além disso, o cuidado ambiental é destacado na gestão do ciclo de vida dos produtos, com a recolha, verificação de desempenho e redistribuição eficiente dos eletrodomésticos, incluindo sua destinação responsável para mercados secundários.

4.2.3.2 Bumble Bee Foods

A Bumble Bee Foods é uma empresa privada especializada em frutos do mar enlatados, com foco em atum, salmão e outros frutos do mar. A empresa reconhece a crescente conscientização dos consumidores em relação à sustentabilidade. No setor, a fidelidade à marca não se mantém sem um compromisso com a qualidade e segurança alimentar. Para abordar essa necessidade, a Bumble Bee Foods utiliza o serviço de Blockchain da SAP Cloud Platform, buscando inovações contínuas para aprimorar a rastreabilidade e segurança de seus frutos do mar (Kouhizadeh; Zhu; Sarkis, 2019, apud Marr 2019).

Um dos projetos-piloto ocorreu em 2017, quando a Bumble Bee Foods implementou o Blockchain para rastrear o atum albacora desde a origem até o ponto final de venda. Consumidores e varejistas podem acessar a jornada completa e o histórico de processamento do atum da Bumble Bee Foods, escaneando o código de resposta rápida (QR Code) na embalagem do produto. Esse processo permite o compartilhamento instantâneo de informações

para o usuário final, incluindo o tamanho da captura, ponto de captura e ciclo de processamento transparente. Tais informações oferecem aos participantes da cadeia de suprimentos dados sobre autenticidade alimentar, frescor e segurança, além de apoiar certificações de pesca justa e sustentabilidade na origem (Kouhizadeh; Zhu; Sarkis, 2019).

Após o sucesso do projeto-piloto com o atum albacora, a Bumble Bee Foods expandiu a aplicação da tecnologia Blockchain para toda a cadeia de suprimentos, abordando questões de rotulagem incorreta e fraudes (Kouhizadeh; Zhu; Sarkis, 2019).

A tecnologia Blockchain pode ser aplicada em uma escala ainda maior na indústria pesqueira para beneficiar as dimensões da Economia Circular. Por exemplo, a Blockchain pode ser utilizado para rastrear e evitar a pesca ilegal, não declarada e não regulamentada, que representa a maior ameaça aos ecossistemas marinhos. Com um ecossistema marinho mais transparente, rastreável, seguro e protegido, é possível gerenciar e resolver efetivamente questões como desperdício de recursos, perda de biodiversidade e doenças transmitidas por frutos do mar.

4.2.3.3 Tesla, Inc.

A renomada fabricante norte-americana Tesla, conhecida por seus veículos elétricos de alto desempenho, revolucionou o setor automotivo ao introduzir atualizações de software frequentes para os proprietários de seus carros. Equipados com sensores e radares, esses veículos coletam dados de uso, os quais são analisados e devolvidos aos usuários na forma de aprimoramentos técnicos a cada atualização. Essa abordagem permite que a marca aprimore componentes como o sistema de piloto automático, que ajusta a velocidade e possibilita aos motoristas planejar suas viagens com base na autonomia da bateria (Inoue et al., 2019).

Na fábrica da Tesla, a manufatura avançada abrange diversos aspectos. As máquinas, ou seja, os robôs, são equipadas com sensores de conexão e sincronização, resultando em intervenção humana mínima e tempo de inatividade próximo de zero. Além disso, há um elevado grau de flexibilidade, pois cada máquina pode desempenhar diversas tarefas, como soldagem, rebitagem, delimitação e instalação de componentes (Teixeira, 2021 apud Prezi, 2021).

Quando se trata de fábricas de veículos elétricos, as chamadas *Gigafactories* da Tesla são referências em tecnologia. A proposta é produzir novos veículos elétricos com automação avançada e velocidade sem precedentes na indústria automotiva. Além disso, a abordagem da empresa inclui uma dinâmica inovadora no âmbito ambiental, com o uso exclusivo de energia

proveniente de painéis fotovoltaicos. Essa escolha não apenas permite uma economia de escala significativa para as baterias de lítio, componente fundamental dos veículos elétricos, mas também garante que essas baterias sejam 100% reaproveitáveis e recicláveis. A *Gigafactory* busca criar um sistema de loop fechado, reutilizando os mesmos materiais para diversas finalidades e evitando desperdício (Teixeira, 2021 apud E-Cycle, 2021).

Por meio de parcerias estratégicas, a *Gigafactory* busca produzir baterias a um custo reduzido, beneficiando-se da economia de escala, inovações na manufatura de materiais e otimização de processos. A colaboração entre empresas na *Gigafactory* não apenas reduz os gastos, mas também, ao ter todas as linhas de produção sob o mesmo teto, otimiza vários processos, proporcionando uma redução estimada de 30% no custo do kilowatt-hora (kWh) (Teixeira, 2021 apud E-Cycle, 2021).

A Tesla conseguiu harmonizar princípios da Economia Circular com as inovações da Indústria 4.0 em suas *Gigafactories*. Ao introduzir atualizações de software em seus veículos elétricos, a empresa não apenas aprimora constantemente o desempenho técnico, mas também estabelece um ciclo contínuo de melhoria baseado na análise de dado. A abordagem da Tesla na manufatura avançada, com máquinas altamente automatizadas e flexíveis, reduz a intervenção humana e maximiza a eficiência. Além disso, a *Gigafactory* adota uma postura ambientalmente responsável ao empregar exclusivamente energia solar, promovendo a sustentabilidade na produção de baterias de lítio e fechando o ciclo ao garantir a reutilização e reciclagem eficiente dos materiais. A colaboração estratégica e a otimização de processos dentro da *Gigafactory* reforçam a sinergia entre a Economia Circular e a Indústria 4.0, resultando em benefícios econômicos e ambientais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo investigou a convergência entre dois temas de crescente relevância global: a Economia Circular e a Indústria 4.0. Para tal, conduziu-se uma revisão sistemática da literatura, apoiada por uma análise bibliométrica e uma abordagem qualitativa. Os resultados revelaram que as tecnologias da Indústria 4.0 impulsionam a transição a uma Economia Circular.

A análise bibliométrica evidenciou um notável aumento no interesse acadêmico e científico pela abordagem conjunta da Economia Circular e da Indústria 4.0. O crescente escopo de pesquisas sobre a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 para fomentar práticas sustentáveis, alinhadas aos princípios da Economia Circular, denota a conscientização sobre a importância dessa integração na busca por soluções mais eficientes e sustentáveis.

Dentre as tecnologias em foco, a Internet das Coisas, a computação em Nuvem e o Big Data destacam-se como as mais amplamente estudadas nesse contexto, convergindo com práticas relacionadas à Simulação, Manufatura Aditiva e Blockchain. Este enfoque integrado destaca a sinergia entre a inovação tecnológica e os princípios circulares, apontando para um caminho promissor na construção de sistemas mais eficientes e ecologicamente conscientes.

Estamos diante de desafios significativos ao buscar impulsionar a Economia Circular alinhada à Indústria 4.0. Essa realidade revela a complexidade do processo, que, embora fundamental para orientar organizações e sociedades na atual revolução industrial em direção ao desenvolvimento sustentável, está longe de ser simples. Para enfrentar essa jornada, é essencial adotar uma nova mentalidade e envolver ativamente governos, empresas e a sociedade civil.

No contexto amplo e desafiador que se apresenta, a implementação de ações efetivas exige um comprometimento conjunto. As indústrias e empresas devem estar atentas às oportunidades que se apresentam, considerando uma mudança na economia como um meio de alcançar uma qualidade de vida superior. Nesse cenário, a colaboração entre os setores público e privado, juntamente com a participação ativa da sociedade, torna-se fundamental para impulsionar a transição para práticas mais sustentáveis e circulares.

A complexidade dessa transformação requer um esforço coordenado e estratégico, destacando a importância de uma abordagem abrangente. A mudança na mentalidade empresarial é um ponto central, pois as organizações precisam se adaptar e inovar para prosperar em um ambiente econômico mais sustentável. Portanto, a convergência de esforços entre governos, empresas e a sociedade civil não é apenas desejável, mas crucial para enfrentar

os desafios e aproveitar as oportunidades apresentadas pela transição para uma Economia Circular na era da Indústria 4.0.

Em conclusão, o estudo destaca a necessidade premente de uma abordagem colaborativa e proativa na integração da Economia Circular e da Indústria 4.0. A conscientização crescente sobre a importância dessa convergência reflete não apenas um avanço acadêmico, mas também uma resposta ao imperativo global de sustentabilidade. Enquanto as tecnologias da Indústria 4.0 oferecem o impulso necessário para a transição, a mudança de mentalidade nas empresas torna-se um ponto-chave para o sucesso dessa jornada. Portanto, diante dos desafios complexos e das oportunidades transformadoras, a colaboração entre diversos setores da sociedade emerge como um fator crítico, destacando a urgência de uma ação coordenada para moldar um futuro mais eficiente e ecologicamente consciente na interseção da Economia Circular e da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Gabriel de Ávila de; AGUIAR, Marina Fernandes; JUGEND, Daniel. Estímulos e barreiras para a economia circular no setor alimentício. **Revista Produção Online**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 837-862, 2021. DOI 10.14488/1676-1901.v21i3.4321.

ALVES, N. C. TRIVIÑOS, Augusto Nivaldo Silva. Introdução à Pesquisa em Ciências Sociais: a Pesquisa Qualitativa em Educação – O Positivismo, A Fenomenologia, O Marxismo. **Formação (Online)**, [S. l.], v. 1, n. 20, 2013. DOI: 10.33081/formacao.v1i20.2335. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/formacao/article/view/2335>. Acesso em: 17 out. 2023.

ASADOLLAHI-YAZDI, Elnaz *et al.* Industry 4.0: revolution or evolution?. **American Journal Of Operations Research**, [S.L.], v. 10, n. 06, p. 241-268, 2020. DOI 10.4236/ajor.2020.106014.

AWAN, Usama; SROUFE, Robert; SHAHBAZ, Muhammad. Industry 4.0 and the circular economy: a literature review and recommendations for future research. **Business Strategy And The Environment**, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 2038-2060, 12 jan. 2021. DOI 10.1002/bse.2731.

BAG, Surajit; GUPTA, Shivam; KUMAR, Sameer. Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. **International Journal Of Production Economics**, [S.L.], v. 231, p. 107844, jan. 2021. DOI 10.1016/j.ijpe.2020.107844.

BAG, Surajit *et al.* Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: an empirical study. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 281, p. 125233, jan. 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.125233.

BAG, Surajit *et al.* Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 152, p. 104502, jan. 2020. DOI 10.1016/j.resconrec.2019.104502.

BAG, Surajit *et al.* Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities. **Technological Forecasting And Social Change**, [S.L.], v. 163, p. 120420, fev. 2021. DOI 10.1016/j.techfore.2020.120420.

BARQUET, Ana Paula Bezerra *et al.* Employing the business model concept to support the adoption of product–service systems (PSS). **Industrial Marketing Management**, [S.L.], v. 42, n. 5, p. 693-704, jul. 2013. DOI 10.1016/j.indmarman.2013.05.003.

BLOMSMA, Fenna; BRENNAN, Geraldine. The Emergence of Circular Economy: a new framing around prolonging resource productivity. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 603-614, 2017. DOI 10.1111/jiec.12603.

BRESSANELLI, Gianmarco *et al.* Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies. **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 639, 28 fev. 2018. DOI 10.3390/su10030639.

CAMILO, Cláudia; GARRIDO, Margarida Vaz. A revisão sistemática de literatura em psicologia: desafios e orientações. **Análise Psicológica**, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 535-552, 3 dez. 2019. DOI 10.14417/ap.1546.

CAMPOS, Elaine Aparecida Regiani de *et al.* Construction and qualitative assessment of a bibliographic portfolio using the methodology Methodi Ordinatio. **Scientometrics**, [S.L.], v. 116, n. 2, p. 815-842, 8 jun. 2018. DOI 10.1007/s11192-018-2798-3.

CARVALHO, Gustavo Dambiski Gomes de *et al.* Bibliometrics and systematic reviews: a comparison between the proknow-c and the methodi ordinatio. **Journal Of Informetrics**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 101043, ago. 2020. DOI 10.1016/j.joi.2020.101043.

DANTAS, T.e.T. *et al.* How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production And Consumption**, [S.L.], v. 26, p. 213-227, 2021. DOI 10.1016/j.spc.2020.10.005.

DEV, Navin K.; SHANKAR, Ravi; QAISER, Fahham Hasan. Industry 4.0 and circular economy: operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 153, p. 104583, fev. 2020. DOI 10.1016/j.resconrec.2019.104583.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Princípios da economia circular**. 2023. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/eliminar-residuos-e-poluicao>. Acesso em: 14 out. 2023.

ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 23., 2021, Online. **REVISÃO TEÓRICA SOBRE MODELOS DE ECONOMIA CIRCULAR**. Online: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, 2021. 17 p.

ESMAEILIAN, Behzad *et al.* Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 163, p. 105064, dez. 2020. DOI 10.1016/j.resconrec.2020.105064.

FATIMAH, Yun Arifatul *et al.* Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: a case study of indonesia. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 269, p. 122263, out. 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.122263.

FERNANDES, Sânia. **Economia circular**. 2023. Disponível em: <https://flexmethod4innovation.com/pratica/economia-circular/>. Acesso em: 14 out. 2023.

FONTELLES, Mauro José *et al.* METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. **Núcleo de Bioestatística Aplicado À Pesquisa da Universidade da Amazônia**, Belém, p. 1-8, 2009.

FRANK, Alejandro Germán; DALENOGARE, Lucas Santos; AYALA, Néstor Fabián. Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal Of Production Economics**, [S.L.], v. 210, p. 15-26, 2019. DOI 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.

GEISSDOERFER, Martin *et al.* The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 143, p. 757-768, 2017. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 114, p. 11-32, 2016. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

GHOBAKHLOO, Morteza. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward industry 4.0. **Journal Of Manufacturing Technology Management**, [S.L.], v. 29, n. 6, p. 910-936, 2018. DOI 10.1108/JMTM-02-2018-0057

GUPTA, Himanshu; KUMAR, Ashwani; WASAN, Pratibha. Industry 4.0, cleaner production and circular economy: an integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 295, p. 126253, maio 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.126253.

HANEMAAIJER, Aldert. et al. Circular economy report 2023 – Assessment for Netherlands – Summary and Main Findings. PBL Publishers, 2023. Disponível em: <https://www.pbl.nl/en/publications/integral-circular-economy-report-2023-assessment-for-the-netherlands>. Acesso em 15 out. 2023

HERMANN, Mario; PENTEK, Tobias; OTTO, Boris. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. **2016 49Th Hawaii International Conference On System Sciences (Hicss)**, [S.L.], p. 3928-3937, 2016. DOI 10.1109/hicss.2016.488.

JABBOUR, Ana Beatriz Lopes de Sousa *et al.* Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals Of Operations Research**, [S.L.], v. 270, n. 1-2, p. 273-286, 1 fev. 2018. DOI 10.1007/s10479-018-2772-8.

JONES, Jason B.. **An Introduction to Additive Manufacturing (Also known as 3D printing)**. Disponível em:

[https://additivemanufacturing.com/basics/#:~:text=Additive%20Manufacturing%20\(AM\)%20is%20an,human%20tissue..](https://additivemanufacturing.com/basics/#:~:text=Additive%20Manufacturing%20(AM)%20is%20an,human%20tissue..) Acesso em: 14 out. 2023.

KAGERMANN, Henning; HELBIG, Johannes; WAHLSTER, Wolfgang. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0**: final report of the industrie 4.0 working group. Frankfurt: Forschungsunion, 2013. 112 p.

KAMBLE, Sachin S. *et al.* Sustainable Industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 117, p. 408-425, 2018. DOI 10.1016/j.psep.2018.05.009.

KIRCHHERR, Julian *et al.* Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 127, p. 221-232, 2017. DOI 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

KORHONEN, Jouni; HONKASALO, Antero; SEPPÄLÄ, Jyri. Circular Economy: the concept and its limitations. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 143, p. 37-46, 2018. DOI 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.

KOUHIZADEH, Mahtab; ZHU, Qingyun; SARKIS, Joseph. Blockchain and the circular economy: potential tensions and critical reflections from practice. **Production Planning & Control**, [S.L.], v. 31, n. 11-12, p. 950-966, 9 dez. 2019. DOI 10.1080/09537287.2019.1695925.

KRISTOFFERSEN, Eivind *et al.* The smart circular economy: a digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. **Journal Of Business Research**, [S.L.], v. 120, p. 241-261, nov. 2020. DOI 10.1016/j.jbusres.2020.07.044.

KUMAR, Pravin; SINGH, Rajesh Kr; KUMAR, Vikas. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: analysis of barriers. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 164, p. 105215, jan. 2021. DOI 10.1016/j.resconrec.2020.105215.

KUMAR, Ravinder; SINGH, Rajesh Kr.; DWIVEDI, Yogesh Kr.. Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: analysis of challenges. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 275, p. 124063, dez. 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.124063.

KUMAR, Shashank *et al.* To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 293, p. 126023, abr. 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.126023.

LASI, Heiner; FETTKE, Peter; KEMPER, Hans-Georg; FELD, Thomas; HOFFMANN, Michael. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014. DOI 10.1007/s12599-014-0334-4.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, [S.L.], v. 3, p. 18-23, 2015. DOI 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.

MERLI, Roberto *et al.* How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 178, p. 703-722, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.12.112.

MOLLA, Altaf Hossain *et al.* An Assessment of Drivers and Barriers to Implementation of Circular Economy in the End-of-Life Vehicle Recycling Sector in India. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 20, p. 13084, 12 out. 2022. DOI 10.3390/su142013084.

MORESI, Eduardo. **Metodologia da Pesquisa**. 2003. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação, Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2003.

MORSELETTO, Piero. Targets for a circular economy. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 153, p. 104553, 2020. DOI 10.1016/j.resconrec.2019.104553.

MURRAY, Alan; SKENE, Keith; HAYNES, Kathryn. The Circular Economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. **Journal Of Business Ethics**, [S.L.], v. 140, n. 3, p. 369-380, 2015. DOI 10.1007/s10551-015-2693-2

OZTEMEL, Ercan; GURSEV, Samet. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal Of Intelligent Manufacturing**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 127-182, 2018. DOI 10.1007/s10845-018-1433-8.

PISCHING, Marcos A. *et al.* ARQUITETURA PARA DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS CIBER-FÍSICOS APLICADOS NA INDUSTRIA 4.0. **XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, [s. l], p. 326-331, 2017.

PRIETO-SANDOVAL, Vanessa; JACA, Carmen; ORMAZABAL, Marta. Towards a consensus on the circular economy. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 179, p. 605-615, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.12.224.

POTTING, Jose. *et al.* Circular economy: measuring innovation in the product chain. PBL Publishers, 2017. Disponível em: <https://www.pbl.nl/en/publications/circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains> Acesso em 15 out. 2023

ROGERS, Heather A.; DEUTZ, Pauline; RAMOS, Tomás B.. Repairing the circular economy: public perception and participant profile of the repair economy in hull, uk. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 168, p. 105447, maio 2021. DOI 10.1016/j.resconrec.2021.105447.

ROSA, Paolo *et al.* Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. **International Journal Of Production Research**, [S.L.], v. 58, n. 6, p. 1662-1687, 2019. 10.1080/00207543.2019.1680896.

ROJKO, Andreja. Industry 4.0 Concept: background and overview. **International Journal Of Interactive Mobile Technologies (Ijim)**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 77, 2017. DOI 10.3991/ijim.v11i5.7072.

RÜßMANN, Michael et al. **Industry 4.0**: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group, v. 9, 2015.

SAMPAIO, Rf; MANCINI, Mc. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007. DOI 10.1590/s1413-35552007000100013.

SANTOS, Maria Cecília Martins. **Indústria 4.0**: : impactos disruptivos causados na indústria, economia e sociedade durante o período pandêmico da covid-19. 2022. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SILVA, G. L. F.. KNECHTEL, Maria do Rosário. Metodologia da pesquisa em educação: uma abordagem teórico-prática dialogada. curitiba. **Praxis Educativa**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 531-534, 6 jun. 2016. DOI 10.5212/praxeduc.v.11i2.0013.

SHAFIQUE, Kinza *et al.* Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: a review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5g-iot scenarios. **Ieee Access**, [S.L.], v. 8, p. 23022-23040, 2020. DOI 10.1109/access.2020.2970118.

SHROUF, F.; ORDIERES, J.; MIRAGLIOTTA, G.. Smart factories in Industry 4.0: a review of the concept and of energy management approached in production based on the internet of things paradigm. **2014 Ieee International Conference On Industrial Engineering And Engineering Management**, [S.L.], p. 697-701, dez. 2014. DOI 10.1109/ieem.2014.7058728.

SILVA, Vinícius Radetzke da *et al.* Conceitualidade x realidade, a conjuntura atual para a implementação da indústria 4.0 no Brasil. **Revista de Administração da Ufsm**, [S.L.], v. 13, p. 1423-1440, 2020. DOI 10.5902/1983465945282.

SOARES, Patrícia Bourguignon *et al.* Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 175-185, jan. 2016. DOI 10.1590/s1678-86212016000100067.

SU, Biwei *et al.* A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 42, p. 215-227, 2013. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.11.020.

SUNG, Tae Kyung. Industry 4.0: a korea perspective. **Technological Forecasting And Social Change**, [S.L.], v. 132, p. 40-45, 2018. DOI 10.1016/j.techfore.2017.11.005.

TEIXEIRA, Cynthia Helena Soares Bouças. **A ECONOMIA CIRCULAR NA ERA DA 4ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL**: uso da tecnologia rumo à transição. 2021. 116 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialista em Gestão Estratégica de Negócios, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

TEIXEIRA, C. H. S. B.; Teixeira, R. L. P. **Cenário da indústria 4.0 e a gestão da qualidade**. Engenharia 4.0: a era da produção inteligente. 1ª ed. São Luís / MA: Editora Pascal, 2021, v. 5, p. 175-183.

THOBEN, Klaus-Dieter; WIESNER, Stefan; WUEST, Thorsten. “Industrie 4.0” and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. **International Journal Of Automation Technology**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 4-16, 2017. DOI 10.20965/ijat.2017.p0004.

TSENG, Ming-Lang *et al.* Sustainable industrial and operation engineering trends and challenges Toward Industry 4.0: a data driven analysis. **Journal Of Industrial And Production Engineering**, [S.L.], v. 38, n. 8, p. 581-598, 11 jul. 2021. DOI 10.1080/21681015.2021.1950227.

TUKKER, Arnold. Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? experiences from suspronet. **Business Strategy And The Environment**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 246-260, jul. 2004. DOI 10.1002/bse.414.

UPADHYAY, Arvind *et al.* Blockchain technology and the circular economy: implications for sustainability and social responsibility. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 293, p. 126130, abr. 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.126130.

WALSH, Steven *et al.* The digital revolution: mining starts to reinvent the future. **Delloite**, [s. l.], p. 1-13, 2017.

WANG, Shiyong *et al.* Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: an outlook. **International Journal Of Distributed Sensor Networks**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 3159805, 2016. DOI 10.1155/2016/3159805.

WILEY. **Eight types of product–service system: eight ways to sustainability?** experiences from suspronet. eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.414>. Acesso em: 12 out. 2023.

XU, Li da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal Of Production Research**, [S.L.], v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018. DOI 10.1080/00207543.2018.1444806.

YADAV, Gunjan *et al.* A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: an automotive case. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 254, p. 120112, maio 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120112.

ZANELLA, Liane Carly Hermes. **Metodologia de Pesquisa**. 2. ed. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/Ufsc, 2011. 134 p.

ZHOU, Keliang; LIU, Taigang; LIANG, Ling. From cyber-physical systems to Industry 4.0: make future manufacturing become possible. **International Journal Of Manufacturing Research**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 167, 2016. DOI 10.1504/ijmr.2016.078251.

ZHU, Donghua *et al.* A process for mining science & technology documents databases, illustrated for the case of. **Ciência da Informação**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 07-14, jan. 1999. DOI 10.1590/s0100-19651999000100002.