

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E MONITORAMENTO
AMBIENTAL

MILTON AUGUSTO BARBOSA

**TECNOLOGIAS APLICADAS EM SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL: UM
MODELO UTILIZANDO CONCEITOS DE ECONOMIA CIRCULAR EM CADEIAS
DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS**

Sorocaba

2025

MILTON AUGUSTO BARBOSA

**TECNOLOGIAS APLICADAS EM SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL: UM
MODELO UTILIZANDO CONCEITOS DE ECONOMIA CIRCULAR EM CADEIAS
DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, para obtenção do título de Doutor em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental.

Orientação: Profa. Dr^a. Débora Zumkeller Sabonaro

Sorocaba

2025

[verso]

Barbosa, Milton Augusto

Tecnologias aplicadas em sistema de gestão ambiental:
um modelo utilizando conceitos de economia circular em
cadeias de suprimentos sustentáveis / Milton Augusto
Barbosa -- 2025.
158f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos,
campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Débora Zumkeller Sabonaro

Banca Examinadora: Adilson Rocha, Jéssica Danila Silva,
Luciel Henrique de Oliveira, Vanessa Cezar Simonetti

Bibliografia

1. Cadeias de suprimentos sustentáveis. 2. Economia
Circular. 3. Tecnologias. I. Barbosa, Milton Augusto. II.
Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

FOLHA DE APROVAÇÃO

MILTON AUGUSTO BARBOSA

TECNOLOGIAS APLICADAS EM SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL: UM MODELO UTILIZANDO CONCEITOS DE ECONOMIA CIRCULAR EM CADEIAS DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental
para obtenção do título de Doutor em
Monitoramento Ambiental. Sorocaba, 16 de
junho de 2025.

Orientadora

Dr^a. Débora Zumkeller Sabonaro
Universidade Federal de São Carlos

Examinador

Dr. Adilson Rocha
Faculdade de Tecnologia de Sorocaba

Examinadora

Dr^a. Jéssica Danila Silva
Centro Universitário Facens

Examinador

Dr. Luciel Henrique de Oliveira
PUC Minas

Examinador(a)

Dr^a. Vanessa Cezar Simonetti
Universidade de Sorocaba

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Milton Alves Barbosa e Inês Sandre Barbosa (*in memoriam*) por motivação aos estudos, ao meu filhos Eduardo Augusto Barbosa, as minhas filhas Ana Claudia Barbosa e Ana Luiza F. Barbosa, a Benice Valéria Rodrigues de Campos e a todos os meus professores e professoras que me proporcionaram educação gratuita de qualidade, em especial a minha orientadora Dra. Débora Zumkeller Sabonaro.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, a minha orientadora Professora Dr^a. Débora Zumkeller Sabonaro pela motivação, ao apoio do Coordenador Dr. Fábio Abdalla e Dr^a. Iolanda Cristina Silveira Duarte na gestão das etapas do programa, aos professores do PPGBMA pela dedicação, aos professores e professoras da Banca Examinadora, a Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba e Instituto Federal de São Paulo - Campus Boituva.

RESUMO

As sucessivas agendas da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável Global buscam sustentabilidade e qualidade de vida aos seres humanos, equilibrando os pilares ambiental, social e econômico, projetando que as gerações futuras possam continuar consumindo recursos, produtos e serviços respeitando os limites do planeta Terra. Assim, sabendo que os processos industriais de fabricação e, conseqüentemente, o consumo desordenado de produtos e serviços geram impactos adversos ao planeta Terra, os países necessitam colocar em ação os projetos e metas para alcançar a sustentabilidade global. Desta forma, algumas metas podem ser alcançadas com a aplicação de Tecnologias em Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) utilizando conceitos de Economia Circular (EC) em Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS). Inovando e contribuindo para diminuir impactos adversos, nesta tese, o objetivo é demonstrar a aplicação de tecnologias para sustentabilidade e propor um modelo de SGA com base em pilares da EC nas CSS, com apoio de um software declaratório, desde a concepção do desenvolvimento do produto/serviço até o fim do ciclo de vida do produto/serviço. Os métodos e materiais desenvolvidos foram pesquisa bibliográfica aplicada e pesquisa metodológica com investigação intervencionista. Os resultados da pesquisa apresentam várias oportunidades de estudos em tecnologias da I4.0 para serem aplicadas por similaridade na área ambiental, aprofundam o conhecimento das ações necessárias para a real aplicação da EC, proporcionam o uso das informações para a educação ambiental com princípios da EC, desenvolvem conhecimento para sociedade, governo e empresas para elaborar conjuntamente legislação de EC, criam oportunidades para análise e aplicação de modelo de SGA com base em pilares da EC, possibilitam desenvolver, através da multidisciplinaridade profissional, o uso de soluções digitais para dar suporte ao SGA, integração de tecnologias nas cadeias de suprimentos sustentáveis para a melhoria contínua dos processos e validação do software de análise de aspectos e impactos ambientais com ações circulares em cadeias de suprimentos.

Palavras-chave: ESG. Industria 4.0. ISO 14001. Produção Circular. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The successive agendas of the United Nations Organization for Global Sustainable Development seek sustainability and quality of life for human beings, balancing the environmental, social and economic pillars, projecting that future generations can continue to consume resources, products and services respecting the limits of planet Earth. Thus, knowing that industrial manufacturing processes and, consequently, the disorderly consumption of products and services generate adverse impacts on planet Earth, countries need to put projects and goals into action to achieve global sustainability. Thus, some goals can be achieved with the application of Technologies in Environmental Management Systems (EMS) using Circular Economy (CE) concepts in Sustainable Supply Chains (SSC). Innovating and contributing to reduce adverse impacts, this thesis aims to demonstrate the application of technologies for sustainability and propose an EMS model based on EC pillars in SSC, with the support of declarative software, from the conception of the product/service development to the end of the product/service life cycle. The methods and materials developed were applied bibliographic research and methodological research with interventionist investigation. The research results present several opportunities for studies in I4.0 technologies to be applied by similarity in the environmental area, deepen the knowledge of the actions necessary for the real application of CE, provide the use of information for environmental education with CE principles, develop knowledge for society, government and companies to jointly develop CE legislation, create opportunities for analysis and application of EMS model based on CE pillars, enable the development, through professional multidisciplinary, the use of digital to support EMS, integration of technologies in sustainable supply chains for continuous improvement of processes and validation of software for analysis of environmental aspects and impacts with circular actions in supply chains.

Keywords: ESG. Industry 4.0. ISO 14001. Circular Production. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da Revisão Bibliográfica	16
Figura 2 - Revoluções Industriais na Linha do Tempo	23
Figura 3 - Tecnologias da I4.0.....	24
Figura 4 - Comparação entre Economia Linear e Economia Circular	29
Figura 5 - Aspectos da Sustentabilidade e Princípios do 7 Rs ⁺	30
Figura 6 - Pilares da EC para a Casa da Sustentabilidade	31
Figura 7 - Logística Empresarial e Reversa na CS.....	33
Figura 8 - Cadeia de Suprimentos Básica.....	37
Figura 9 - Cadeia de Suprimentos Sustentável.....	37
Figura 10 - Estrutura Pesquisa Aplicada I4.0 em MA.....	42
Figura 11 - Estrutura Pesquisa Aplicada I4.0 em EC na CS	66
Figura 12 - Modelo Estrutural SGA – I4.0 - EC - CSS.....	102
Figura 13 - PDCA - Ciclo de Melhoria Contínua.....	103
Figura 14 - Responsabilidade Ambiental das Empresas e Cidades nas CSS	104
Figura 15 - Cadeia de Suprimentos Sustentável.....	105
Figura 16 - VSM Fluxograma Fabricação e Consumo.....	106
Figura 17 - Fluxo Declaratório do SGA nas CSS.....	107
Figura 18 - Modelo Ação Melhoria e FOFA/SWOT	110
Figura 19 - Metodologia de Solução de Problemas.....	111
Figura 20 - Campos de Registro do Software.....	112
Figura 21 - Registro da CSS Especifica e tabela de Severidade	112
Figura 22 - Registro das Ações	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tecnologias da Indústria 4.0	24
Tabela 2 - Atividades da Logística Empresarial Integrada e Logística Reversa	33
Tabela 3 - Etapas de ações Intervencionistas no Desenvolvimento do modelo	98
Tabela 4 - Matriz FOFA / SWOT para Pilares de EC	108
Tabela 5 - Tipos de Impactos e Critério de Severidade	114
Tabela 6 - Formação Superior e Especialização dos Profissionais Entrevistados	118
Tabela 7 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 1	121
Tabela 8 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 2	122
Tabela 9 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 3	124
Tabela 10 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 4	125
Tabela 11 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 5	126
Tabela 12 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 2	127
Tabela 13 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 7	128
Tabela 14 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 8	130
Tabela 15 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 9	131
Tabela 16 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 10	132
Tabela 17 - Resumo das Respostas dos Profissionais	133

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de Artigos I4.0 - MA / Ano.....	43
Gráfico 2 - Número de Artigos I4.0 - MA / Segmento	43
Gráfico 3 - Número Artigos MA e Tecnologias I4.0	44
Gráfico 4 - Número de Artigos I4.0 – CS - EC / Ano	67
Gráfico 5 - Número de Artigos de EC / Tecnologias da I4.0	67
Gráfico 6 - Número de Artigos da I4.0 nos Pilares da EC	68
Gráfico 7 - % de artigos de EC / Segmentos de Produtos	69
Gráfico 8 - No. de Artigos de Aplicação de Pilares de EC / Segmento Específico	69
Gráfico 9 - % de Respostas da Pesquisa.....	117
Gráfico 10 - Resultado da Entrevista da Questão 1	118
Gráfico 11 - Resultado da Entrevista da Questão 2.....	119
Gráfico 12 - Resultado da Entrevista da Questão 3	119
Gráfico 13 - Resultado da Entrevista da Questão 4.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>Big Data</i>	Grande Quantidade de Dados
<i>Block Chain</i>	Processo de registro de transações e de controle de ativos em uma rede
<i>Cloud</i>	Nuvem
<i>CPS</i>	<i>Cyber Physical System</i>
CS	Cadeias de Suprimentos
CSS	Cadeias de Suprimentos Sustentáveis
EC	Economia Circular
I4.0	Indústria 4.0
IA	Inteligência Artificial
<i>IoS</i>	<i>Internet of Service – Internet de Serviços</i>
<i>IoT</i>	<i>Internet of Things – Internet das Coisas</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
MA	Monitoramento Ambiental
MAD	Manufatura Aditiva = Impressora 3D
<i>ML</i>	<i>Machine Learning – Aprendizado de Máquinas</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUD	Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas
RFID	Radiofrequência de Identificação
RI 4.0	4ª. Revolução Industrial
<i>SCM</i>	<i>Supply Chain Management</i>
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
<i>UNDP</i>	<i>United Nations Development Programme</i>
<i>WSN</i>	<i>Wireless Sensors Network - Redes de Sensores sem Fio</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 SISTEMAS DE GESTÃO AMBIENTAL (SGA)	17
2.2 MONITORAMENTO AMBIENTAL (MA).....	18
2.3 TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 (I4.0).....	22
2.4 ECONOMIA CIRCULAR (EC)	27
2.5 LOGÍSTICA EMPRESARIAL INTEGRADA REVERSA.....	32
2.6 CADEIAS DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS (CSS)	36
2.7 CIDADES SUSTENTÁVEIS	40
2.8 TECNOLOGIAS DA I4.0 EM MONITORAMENTO AMBIENTAL.....	41
2.9 TECNOLOGIAS DA I4.0 EM ECONOMIA CIRCULAR NAS CS	65
3 MATERIAL E MÉTODOS	92
3.1 SITUAÇÃO PROBLEMA DA PESQUISA	92
3.2 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA.....	95
3.3 HIPÓTESES DA PESQUISA	97
3.4 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO MODELO SGA EC CSS E SOFTWARE.....	98
4 RESULTADOS DO MODELO DO SGA - EC – CSS - SOFTWARE DE APOIO	101
4.1 MODELO SGA - EC - CSS.....	101
4.2 SOFTWARE SUPORTE DECLARATÓRIO DO SGA NAS CSS.....	111
4.3 RESULTADOS DO MODELO DE SGA – EC - CSS	115
4.4 RESULTADOS DO TESTE E VALIDAÇÃO DO SOFTWARE DE APOIO	117
4.4.1 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 1.....	120
4.4.2 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 2.....	122
4.4.3 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 3.....	123

4.4.4 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 4.....	125
4.4.5 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 5.....	126
4.4.6 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 6.....	127
4.4.7 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 7.....	128
4.4.8 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 8.....	129
4.4.9 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 9.....	131
4.4.10 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 10.....	132
4.4.11 Resumo Comparativo das Respostas dos Profissionais	133
5 CONCLUSÃO.....	135
REFERÊNCIAS	137

1 INTRODUÇÃO

A Agenda 2030 da ONU, tem dezessete metas globais e busca uma unificação dos governos mundiais para a sustentabilidade do planeta Terra. A Agenda propõe aos parceiros envolvidos tópicos, metas e ações aplicadas com estratégias para, no futuro, conseguir a melhoria da qualidade de vida dos seres humanos nos aspectos ambiental, social e econômico.

As metas globais de sustentabilidade da Agenda 2030 da ONU organizadas pela agência *UNDP*, buscam iniciativas de uma Educação de Qualidade com Inclusão e Sem fome, Preservação das Águas, Água Limpa e Saneamento, Energia Limpa e Acessível, Vida na Terra sem Contaminações, Trabalho Digno, Crescimento da Economia, Consumo Consciente, Inovação, Produção Limpa, Ações para o Clima e Cidades Inteligentes para melhorar a Saúde e Bem-estar da humanidade.

Mas a problemática global é que os indicadores de sustentabilidade e impactos ambientais demonstram, através de números, um consumo desordenado de recursos naturais, utilização excessiva e poluição de água, consumo excessivo de energias não renováveis e poluidoras, contaminação e poluição de solo, produção excessiva dos bens de consumo e suas embalagens, excesso de uso de materiais não degradáveis e, às vezes, contaminantes, não reutilizáveis, não recicláveis e descartes incorretos dos produtos no final do ciclo de vida, gerando poluições no meio ambiente onde os seres vivos estão sofrendo as mais graves consequências de acordo com sua luta de combate aos efeitos a que estão expostos.

Nesse contexto, as pesquisas indicam dificuldades de aplicar as ações de uma sustentabilidade global e os grandes projetos são incertos e complexos. Uma possibilidade é o desdobramento das metas e ações considerando as cadeias de suprimentos sustentáveis com aplicação de inovações factíveis das tecnologias da I4.0 nos pilares da EC para a sustentabilidade, colaborando com as metas globais da Agenda 2030 da ONU.

A integração das tecnologias atuais da I4.0 aplicadas em Sistema de Gestão Ambiental (SGA) com base em pilares da Economia Circular (EC) nas Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS) poderá otimizar os processos e apresentar um resultado positivo para a sustentabilidade, segundo Lei (2022,), Liu (2022) e Khan (2022).

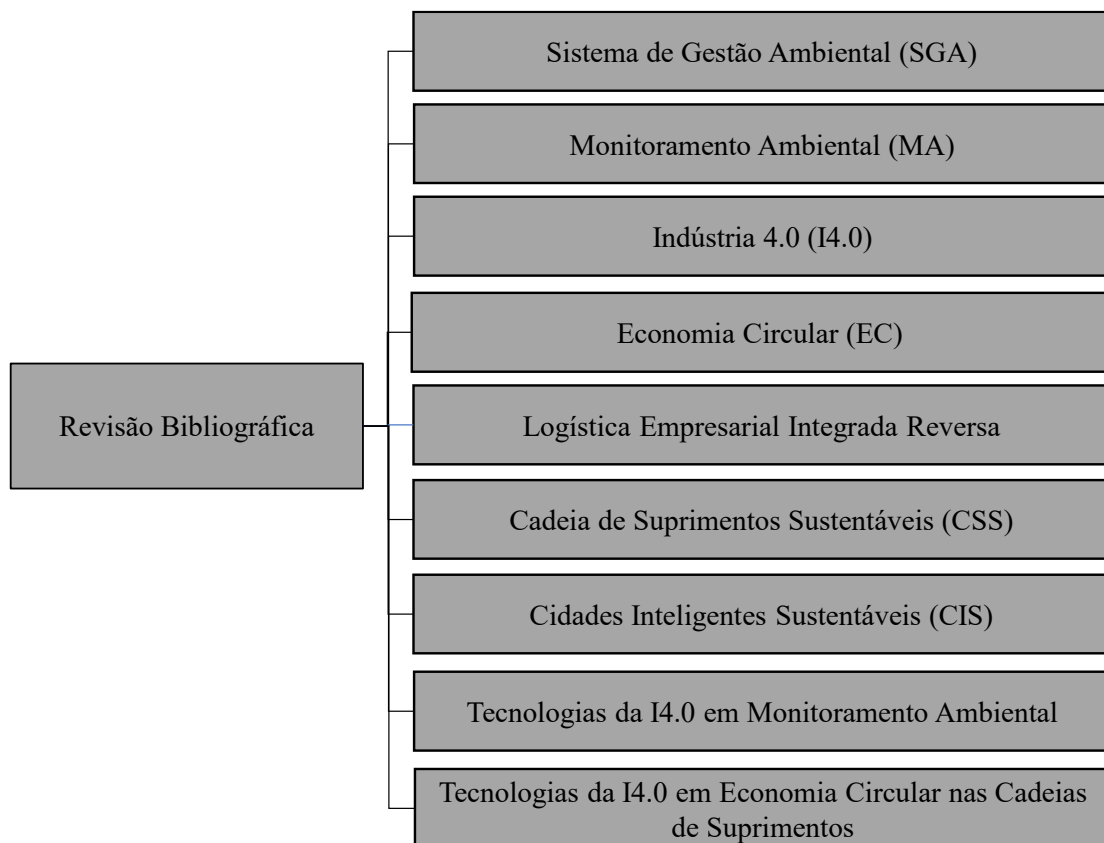
O objetivo desta tese é demonstrar a aplicação de tecnologias para sustentabilidade e propor um modelo de SGA com base em pilares da EC nas CSS, com apoio de um software declaratório desde a concepção do desenvolvimento do produto/serviço até o fim do ciclo de vida do produto/serviço.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Vergara (2009), uma revisão bibliográfica é um estudo sistematizado desenvolvido com base em material publicado em livros, revistas, jornais, redes eletrônicas, isto é, material acessível ao público em geral. Fornece instrumental analítico para qualquer outro tipo de pesquisa, mas também pode-se esgotar em si mesma. O material publicado pode ser fonte primária em livros com afirmações teóricas originais ou secundária com análises das afirmações teóricas originais ou edições das originais.

Foi realizado uma revisão bibliográfica para conceituar Sistema de Gestão Ambiental (SGA), Monitoramento Ambiental (MA), Indústria 4.0 (I4.0), Economia Circular (EC), Logística Empresarial Integrada Reversa, Cadeia de Suprimentos Sustentáveis (CSS) e Cidades Inteligentes Sustentáveis (CIS), Tecnologias da I4.0 em Monitoramento Ambiental e Tecnologias em Economia Circular nas Cadeias de Suprimentos . Os conceitos dos tópicos foram extraídos de livros, artigos científicos, dissertações, teses, normas internacionais e órgãos governamentais oficiais.

Figura 1 - Estrutura da Revisão Bibliográfica



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

2.1 SISTEMAS DE GESTÃO AMBIENTAL (SGA)

Sistema de Gestão Ambiental (SGA) é um conjunto estruturado de atividades de planejamento, análise, controle dos riscos e impactos ambientais nas entradas de recursos, operação dos processos, saída de produtos e serviços, resíduos e descartes de produtos quando no final de vida em todas as cadeias de suprimentos das empresas e partes interessadas.

Em 1996, surge a primeira versão de uma Norma Internacional para Sistema de Gestão Ambiental denominada de ISO 14001 (1996), com o objetivo de definir critérios para implantação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) e a versão mais atual é 2015.

A ISO 14001 (2015), apresenta para o SGA o objetivo de prover às organizações uma estrutura para a proteção do meio ambiente e possibilitar uma resposta às mudanças das condições ambientais em equilíbrio com as necessidades socioeconômicas, realizando uma análise de riscos e oportunidades para mitigar impactos ambientais, comprometer a alta direção para planejar recursos para o SGA, operacionalização da cadeia de suprimentos considerando uso consciente de recursos, comprometimento dos colaboradores, monitoramento de resultados, ações corretivas de não conformidades e melhoria contínua.

O SGA - ISO 14001 (2015), contribui para um desenvolvimento sustentável, por meio de:

“proteção do meio ambiente pela prevenção ou mitigação dos impactos ambientais adversos; mitigação de potenciais efeitos adversos das condições ambientais na organização; auxílio à organização no atendimento aos requisitos legais e outros requisitos; aumento do desempenho ambiental; controle ou influência no modo em que os produtos e serviços da organização são projetados, fabricados, distribuídos, consumidos e descartados, utilizando uma perspectiva de ciclo de vida que possa prevenir o deslocamento involuntário dos impactos ambientais dentro do ciclo de vida; alcance dos benefícios financeiros e operacionais que podem resultar da implementação de alternativas ambientais que reforçam a posição da organização no mercado; comunicação de informações ambientais para as partes interessadas pertinentes.” (ISO14001, 2015, p. 15)

Um SGA segundo a ISO 14001 (2015), deve ter um levantamento de riscos e impactos, definir os objetivos, proporcionar um planejamento de ações preventivas e procedimentos sistemáticos para mitigar os efeitos nocivos ao meio ambiente em toda sua cadeia de suprimentos.

Os objetivos ambientais, devem ser:

- a) coerentes com a política ambiental
- b) mensuráveis (se viável)
- c) monitorados
- d) comunicados
- e) atualizados

O Planejamento de ações para alcançar os objetivos ambientais deve determinar:

- a) o que será feito
- b) que recursos serão requeridos
- c) quem será responsável
- d) quando isso será concluído
- e) como os resultados serão avaliados
- f) indicadores para monitorar o progresso dos objetivos ambientais

O SGA deve atuar em ações a não conformidades e impactos ambientais:

- a) tomar ação para controlá-la e corrigi-la a não conformidade
- b) lidar com as consequências, incluindo mitigar impactos ambientais
- c) avaliar a necessidade de ação que não se repita ou ocorra em outro lugar
- d) analisar criticamente a não conformidade
- e) determinar as causas da não conformidade
- f) determinar se não conformidades similares se poderiam ocorrer
- g) implementar qualquer ação necessária
- h) analisar criticamente a eficácia de qualquer ação corretiva tomada
- i) realizar mudanças no sistema de gestão ambiental, se necessário

A organização deve melhorar continuamente a adequação, suficiência e eficácia do sistema de gestão ambiental para aumentar o desempenho ambiental.

2.2 MONITORAMENTO AMBIENTAL (MA)

Segundo Franco (1998), o Monitoramento Ambiental (MA) é um conceito utilizado mundialmente e as pesquisas aplicadas tiveram início após a segunda revolução industrial devido ao uso da energia elétrica, quando a produção em massa de produtos foi consolidada em função do consumo, buscando um mínimo de equilíbrio nos pilares da sustentabilidade.

As pesquisas aplicadas de monitoramento evoluíram ao longo do tempo para acompanhar os impactos ambientais gerados pelas cadeias produtivas que cresceram com o consumo de produtos pela população mundial.

Assim observa após revisão da literatura que o conceito de monitoramento ambiental teve sua evolução ao longo dos anos de acordo com a linha do tempo das revoluções industriais.

Alguns pensadores bem antes da revolução industrial, quando se depararam ainda com o estudo do meio ambiente sem grandes alterações ou mudanças aplicavam um monitoramento simples sem respostas a seus questionamentos.

Segundo relatos de Rosenberg (1993), em seu resumo, Aristóteles há mais de 2000 anos submeteu animais de água doce em água salgada e avaliou o que aquela alteração causava no organismo dos animais.

Já no século XIX com o surgimento dos estudos da química e o marco da 2ª revolução industrial, os pesquisadores iniciaram seus estudos de monitoramento ambiental associando o início da industrialização aos impactos ao meio ambiente e aos seres vivos que ali estavam expostos. Esse questionamento fez alavancar estudos de toxicologia em seres vivos, analisando as respostas nos organismos que eram expostos a mudanças e alterações que impactaram a água, solo e o ar, envolvendo impactos ao meio ambiente como um todo.

Segundo Buss (2003), a primeira determinação de indicadores biológicos em água foi realizada na Alemanha em 1909 analisando bactérias, fungos e protozoários com números elevados eram consideradas poluídas.

Ainda segundo Buss (2003), antes de 1940, o homem começou a questionar e estudar se uma substância química com seus elementos, que a princípio era disponibilizada para uso para trazer benefícios aos seres vivos, poderiam se tornar venenos que afetariam o meio ambiente podendo com suas doses e tempo de exposição ser letal em função da toxicidade.

Até 1950, Buss (2003) descreve que os estudos e conhecimento de eco toxicologia eram considerados ausentes, porém o desenvolvimento industrial causava problemas ao meio ambiente. Na década de 60 a metodologia de índice biótico foi utilizada para determinar os indicadores que classificavam a qualidade da água de acordo com a poluição e iniciam os estudos de toxicologia em peixes e seguem outros vários estudos de organismos expostos ao meio testados em laboratórios ou no meio. Em 1980 continuam outros vários experimentos realizados em outras espécies de anfíbios e são analisadas respostas desses organismos em relação a exposições.

Segundo Rosenberg (1993), pesquisadores defendem pesquisas de toxicologia em peixes expostos em águas contaminadas para determinar limites de exposição e doses, respondendo muitas questões sobre o assunto.

As questões sem respostas sobre toxicologia deram um direcionamento às pesquisas para apresentação de resultados. Segundo Rosenberg (1993), testes de toxicidade responderam várias questões tais como: (1) o material é letal para o organismo em teste e em que concentração? (2) Quais são os efeitos nos organismos expostos a concentrações subletais de uma substância tóxica durante parte ou todo o ciclo de vida? (3) que resíduo ou componente de resíduo é mais tóxico? (4) qual organismo é mais sensível? (5) sob quais condições os resíduos

são mais tóxicos? (6) a toxicidade muda quando o material entra no meio ambiente? (7) o resíduo ou composto puro passa ou falha em algum padrão regulatório? (8) quanto do sistema receptor é afetado? (9) Quais são os efeitos a curto prazo dos derramamentos episódicos?

Pode-se observar que a aplicação dos estudos de toxicologia na década de 70 passa a ser mais específica e quantitativa quanto aos efeitos no organismo por exposição, a letalidade, quais organismos são mais sensíveis, suas doses, quais componentes são mais tóxicos, suas modificações, algum organismo resistente, quanto o organismo é afetado e o prazo para efeito.

No artigo de Hawkes (1998), descreve o a origem e o desenvolvimento do *BMWP*. Neste período foram criados vários índices bióticos para monitoramento da água e o de maior destaque foi o *Biological Monitoring Working Party Score System (BMWP)*, que foi aplicado a invertebrados, no nível taxonômicos de (1 a 10) para mais sensíveis a poluentes orgânicos.

Segundo Rosenberg (1993), alguns autores Doudoroff (1977); Mount (1977); Sprague & Fogels (1977); Warren & Liss, (1977); Cairns & Dickson (1978); Anon (1980); Macek et al. (1978); Cairns, (1980), afirmam que as pesquisas e as exigências legais levaram a um desenvolvimento e melhor aplicação desses métodos para atingir um gerenciamento específico.

Os testes de toxicidade em organismos passaram a ser uma maneira de avaliar substâncias e sua toxicidade, os impactos, os riscos, a letalidade e os limites de exposição ao tempo.

Segundo Bitar (2017) e Rosenberg (1993), o monitoramento ambiental pode ser caracterizado como as respostas dos organismos e a análise das mudanças do meio ambiente e seus impactos em indivíduos ou populações.

Assim, a revisão teórica do conceito de monitoramento ambiental define que é importante questionar qualquer mudança ou alteração natural ou antropogênica do meio ambiente, planejar uma forma de monitorar, coletar amostras de um organismo a ser observado, encontrar uma forma adequada para medir e analisar os indicadores com objetivo de controlar de forma preventiva os riscos e impactos que pode gerar aos seres vivos do meio ambiente.

“O monitoramento ambiental consiste na realização de medições e/ou observações específicas, dirigidas a alguns poucos indicadores e parâmetros, com a finalidade de verificar se determinados impactos ambientais estão ocorrendo, podendo ser dimensionada sua magnitude e avaliada a eficiência de eventuais medidas preventivas adotadas.” (Bitar, 2017, p. 12)

Seguindo a linha do tempo da evolução de monitoramento ambiental e revolução industrial, na publicação do livro *é veneno ou remédio*, Buss (2003) contribui com o monitoramento ambiental dos impactos que os agrotóxicos podem causar ao meio ambiente e aos seres vivos.

Os estudos de biomonitoramento ambiental definem os invertebrados como sendo os organismos e as respostas à exposição de poluição direta ou indireta nas águas.

Afirma ainda que apenas análises tais como físicas, químicas e bacteriológicas não são suficientes para avaliação, pois é necessária uma análise integrada entre a tradicional e os aspectos biológicos do sistema. Assim, afirma que

“As metodologias de monitoramento biológico podem ser empregadas como ferramentas de vigilância, isto é, para acompanhamento contínuo das condições do ecossistema de maneira a detectar alterações acidentais ou decorrentes da implantação de empreendimentos produtivos.” (Buss, 2003, p. 159)

A avaliação das respostas a contaminantes químicos nos organismos que são submetidos a um meio são nos níveis biomoleculares onde existem mudanças genéticas, fisiológicas quanto respiração e metabolismo, indivíduo quanto a mortalidade, crescimento e fecundação, população quanto a estrutura genética, doenças e resistência, comunidade quanto perda de espécies, alterações da espécie e ecossistema quanto eutrofização, produtividade e decomposição.

Mesmo com a evolução das pesquisas, maior compreensão dos resultados e mais específica o efeito-resposta, ainda existe dificuldade no conhecimento quando se trata de poluição indireta, baixas doses no ecossistema por ser complexo e respostas mais lentas.

Ainda vale salientar que o monitoramento ambiental toxicológico é aplicado em meios como solo, ar e água para controle de substâncias e seus efeitos em organismos.

Outras áreas como as de produtos fármacos, saúde do trabalhador e ambientes com modificações por infraestrutura também aparecem nas pesquisas de monitoramento ambiental.

Assim com base em Cairns (1993), Rosenberg (1993) e Buss (2003), o conceito atual de monitoramento ambiental é medir e analisar as respostas qualitativas e quantitativas nos organismos a nível de indivíduo, população, comunidade e ecossistema verificando as mudanças naturais e antropogênicas ocorridas no ambiente.

Na década de 2010, o Ministério do Meio Ambiente no Brasil define monitoramento ambiental da seguinte forma:

“Entende-se por monitoramento ambiental o conhecimento e acompanhamento sistemático da situação dos recursos ambientais dos meios físico e biótico, visando a recuperação, melhoria ou manutenção da qualidade ambiental. A qualidade ambiental está relacionada ao controle de variáveis ambientais, que se alteram, seja em função das ações antrópicas, seja em função de transformações naturais”. (MMA, 2009, p. 4)

Segundo Ramos et al. (2024), em documento eletrônico da Empresa EMBRAPA, o monitoramento ambiental é um processo de coleta de dados, estudo, análise e acompanhamento

contínuo e sistemático das variáveis ambientais, com objetivo de identificar e avaliar informações (dados) qualitativas e quantitativas das condições dos recursos naturais em um determinado momento, assim como as tendências ao longo do tempo.

Com base nos dados coletados, os estudos podem indicar a conservação, preservação, degradação e possibilidades de recuperação do local do estudo e analisar as causas de degradação para tomadas de ações.

Ainda na linha do tempo da evolução da sustentabilidade, considera para o monitoramento ambiental o desenvolvimento da coleta de dados utilizando tecnologias em tempo real para controlar preventivamente degradações e poluições mitigando os impactos negativos.

2.3 TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 (I4.0)

A quarta Revolução Industrial, denominada de Indústria 4.0 (I4.0) ou 4a. Revolução Industrial (RI 4.0) foi apresentada na Alemanha em 2011 com objetivo de transformar processos físicos em virtuais utilizando de tecnologias para proporcionar processos, produtos e serviços rápidos e com respostas ágeis em tempo real integradas nas organizações. Essa transformação utiliza de recursos e tecnologias da I4.0 que tornam os processos mais eficientes e decisórios em diversas áreas.

Após três revoluções, sendo, a revolução Industrial com a máquina a vapor, a revolução da matriz energética da produção em massa e a revolução da Tecnologia de Informação (TI), eletrônica e automação, o mundo passa a solicitar o uso da RI 4.0.

A Figura 2, apresenta um resumo das revoluções industriais na linha do tempo segundo Coelho (2016).

Figura 2 - Revoluções Industriais na Linha do Tempo



Fonte: Coelho (2016).

Segundo Azevedo (2017) e Coelho (2016), estamos utilizando tecnologias da 4ª. Revolução Industrial (RI 4.0), onde a I.4.0 transforma três pilares, tais quais o físico, digital e biológico com grandes impactos na economia, nos negócios, sociedade e governo.

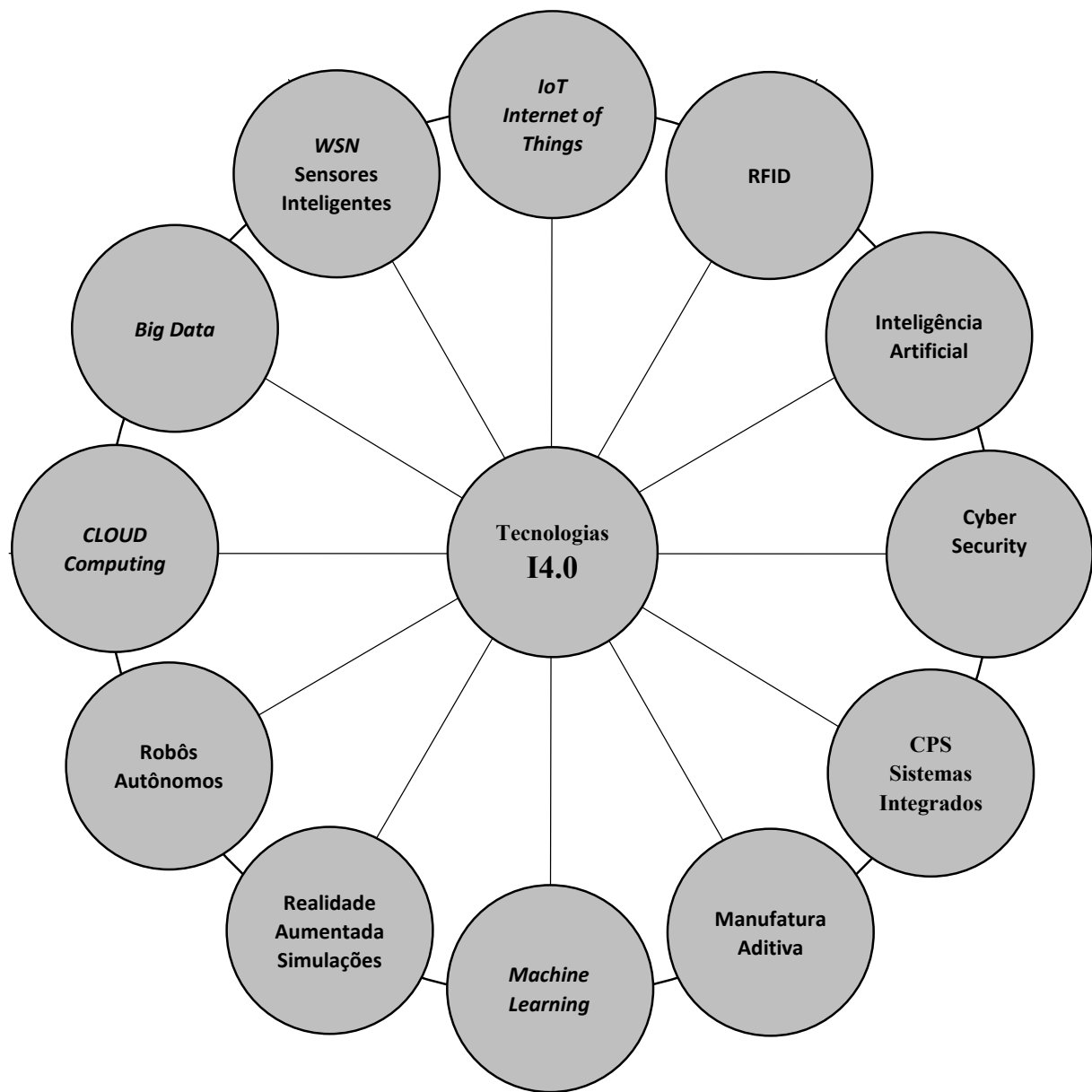
Essa nova revolução, RI 4.0 tem a função de proporcionar processos, produtos e serviços rápidos e com respostas ágeis integradas.

A RI 4.0, apresenta tecnologias diversas que podem ser adaptadas e aplicadas em áreas do conhecimento com objetivo de tornar tomadas de decisões rápidas e precisas para se obter maior produtividade e sustentabilidade.

Segundo Coelho (2016), os recursos tecnológicos são aplicados no conceito da I.4.0 de forma combinada, integrando a sistemas desenvolvidos. Esses sistemas desenvolvidos buscam otimização de processos físicos em virtuais.

A revisão da literatura, demonstra os principais sistemas desenvolvidos que são aplicados nas diversas áreas do conhecimento. A Figura 3, demonstra as tecnologias da I4.0.

Figura 3 - Tecnologias da I4.0



Fonte: Adaptado de Mana (2018)

A Tabela 1, descreve as tecnologias da Indústria 4.0, segundo revisão da literatura.

Tabela 1 - Tecnologias da Indústria 4.0

Tecnologia I.4.0	Conceitos, Definições e Aplicações de Recursos Tecnologias da I4.0
<i>IoT</i> <i>Internet of Things</i> Internet das Coisas	Resume em objetos ligados na internet Costa (2017) e Coelho (2016), compreende a comunicação de sistemas inteligentes usando IP, para integração do sistema buscando a automação e controles de processos podendo se tornar autônomos e inteligentes. “É um sistema de dispositivos de computação inter-relacionados, máquinas mecânicas e digitais, objetos, animais ou pessoas que são fornecidos com

Tecnologia I.4.0	Conceitos, Definições e Aplicações de Recursos Tecnologias da I4.0
<i>IoS</i> <i>Internet of Service</i> Internet de Serviços	identificadores únicos e tem capacidade de transferir dados por meio de uma rede sem a necessidade de interação humano-humano ou humano-computador.” (Mana, 2018, p. 50) “<i>Internet of Service IoS</i> denominada de internet de serviços compreende a arquitetura orientada a serviços sendo a interligação da comunicação desses serviços por partes interessadas para automação e otimização de resultados e respostas rápidas. É composta por participantes, vários fornecedores e estão conectados com os usuários e consumidores, e são acessados por vários canais, por uma infraestrutura de serviços, modelo de negócios e os próprios serviços com valor agregado”. (Mana, 2018, p. 51)
<i>Big Data</i> Quantidade de dados	Becker (2018), a informação se tornou fundamental para o desenvolvimento das indústrias, que utiliza de e uma grande quantidade de dados armazenados a todo instante e necessitam ser analisados na sequência de dados, informação, conhecimento. Costa (2017) e são utilizados de forma integrada junto com outras tecnologias da I.4.0. Segundo Mana (2018), é o processo de examinar grande quantidade de dados para descobrir padrões escondidos, correlações desconhecidas e outras informações úteis que podem ser utilizadas para a melhor tomada de decisão e aplicar sistemas inteligentes. Trata-se de grande quantidade de dados gerados pela <i>IoT</i> são gerenciados e armazenados para posterior uso, inclusive uso para os sistemas inteligentes. Informações para a análise de dados, denominado de <i>data mining</i> são técnicas relativas à pesquisa e análise de dados multivariados no tempo com sistemática de integração de tecnologia, gerando novos conjuntos de dados, associação ao tempo e tendências. <i>Blockchain</i> são livros contábeis ou banco de dados descentralizados armazenados, abertos, atualizados de maneira segura, invioláveis e irreversíveis.
<i>Cloud Computing</i> Computação em Nuvem <i>Fog Computing</i> Computação em tempestade	Segundo Mana (2018), nuvem é local definido onde são gravados e armazenados dados computacionais e usuários têm acesso <i>on-line</i> a qualquer momento através da rede de internet interligadas aos sistemas. Um outro termo é o <i>Fog</i>, um local de armazenagem de dados entre a rede de uso e a nuvem, tornando mais rápido o acesso à informação, para informações direcionadas.
<i>Cyber Security</i> Segurança de Dados	Segundo Costa (2017), a segurança dos dados de informação de forma correta, saída confiável e segura protegendo o conhecimento tecnológico e a segurança pessoal da execução.
Robôs Autônomos	Executam funções e atividades de acordo com programações computacionais, através de coordenadas e informações interligadas de sistemas com foco em operacionalizar processos. “É uma área da ciência e tecnologias que envolve computadores, mecanismos e sistemas, que trata de sistemas compostos por partes mecânicas automáticas e controladas por circuitos integrados tornando sistemas mecânicos

Tecnologia I.4.0	Conceitos, Definições e Aplicações de Recursos Tecnologias da I4.0
	motorizados, controlados manualmente ou automaticamente por circuitos elétricos” (Mana, 2018, p. 51)
Simulações	“Software de simulação de processos industriais nos quais todos os modelos de simulação são criados em escala e são apresentados usando uma visualização em 3D, tornando fácil de ver e reconhecer os gargalos na linha de produção ou outras deficiências dentro do sistema.” (Mana, 2018, p. 67). Também pode ser utilizado para simulação de fabricação tipo usinagem ou outro processo. Os dados coletados e armazenados podem ser usados para simulação.
<i>Additive Manufacturing</i> Manufatura Aditiva	“Descrevem a manufatura aditiva (MA), também conhecida como fabricação em camadas ou prototipagem rápida, como um processo de fabricação fundamentalmente diferente dos métodos de fabricação convencionais, integrando o design assistido por computador, ciência de materiais e controle numérico de computador para fabricar protótipos físicos a partir de modelos virtuais (CAD) camada por camada.” (Mana, 2018, p. 63)
Realidade Aumentada	“A realidade aumentada (RA) permite uma grande variedade de aplicações em diversas áreas, como medicina, educação e atividades industriais. A RA está associada à inserção de informações adicionais ou objetos virtuais sobrepostos ou combinados em uma visualização do mundo real” (Mana, 2018, p. 64) “É tratado também como o aprimoramento da percepção humana por meio da utilização de objetos virtuais. Com a AR (<i>Augmented Reality</i>, em inglês, ou Realidade Aumentada), as informações relevantes podem ser adicionadas diretamente ao campo de visão do trabalhador. Isso é possível com plataformas móveis, <i>como smartphones, tablets e smart glasses</i>” (Mana, 2018, p. 57) Com alta resolução e comunicação on-line com outros equipamentos, as câmeras digitais podem estar ligadas no sistema integrado.
CPS - Sistemas Integrados com programação em <i>hardware e software</i> para supervisão e tomada de decisão.	Segundo Azevedo (2017), Coelho (2016) e Mana (2018), a integração dos sistemas em termos de comunicação utilizando tecnologia da informação para colocar em operação objetos físicos e virtuais viabilizando combinação de processos, utilizando do trânsito de informações cibernético tipo internet sem fio 5G. É um conjunto de computadores no planeta que conseguem trocar, acessar, compartilhar, depositar, tornar disponíveis dados utilizando de um protocolo comum unindo vários usuários ao mesmo tempo através de um IP (<i>identity protocol</i>) e velocidade a todo instante. Máquinas físicas com componentes eletrônicos que permitem formar um equipamento para armazenagem, programação, execução, visualização, entre outros e executar programas denominados de softwares que permitem aplicações específicas de acordo com objetivos e que pode estar em um sistema integrado de comunicação. Sistemas supervisórios são equipamentos que podem conter programas com especificações limites, controles comparativos e tomada de decisão de uma

Tecnologia I4.0	Conceitos, Definições e Aplicações de Recursos Tecnologias da I4.0
	informação recebida e processada, podendo estar interligado gerando e enviando uma saída de informação para outro sistema atuador.
<i>Smart Company</i> (Empresa Inteligente)	Segundo Mana (2018), são empresas inteligentes que podem utilizar as tecnologias integradas em todas as etapas de uma cadeia de suprimentos (CS), dos fornecedores até o cliente final, desenvolvendo produtos e/ou serviços, processos, planejamento, operações, qualidade e logística inteligentes e otimizando os resultados dos processos físicos e virtuais para tomada de decisão e melhorando nível de serviço.
Etiqueta com Radiofrequência de Identificação <i>RFID</i>	Segundo Coelho (2016), etiquetas com pequenos circuitos, denominados de microchips, onde dados gravados podem se comunicar através de rádio frequência sem fios com outros equipamentos que recebem a informação e podem ler essa codificação.
<i>WNS</i> – Rede de Sensores Inteligentes	Segundo Mana (2018), sensores que realizam medição de uma ou mais grandezas, que coletam, analisam a medição e enviam a informação para outros sistemas integrados.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Alguns pesquisadores indicam estudos da 5^a. RI que engloba o social e a qualidade de vida no trabalho e a 6^a. RI que engloba o meio ambiente, e outros pesquisadores que colocam todos os pilares da sustentabilidade (econômico, Social e Ambiental) utilizando as tecnologias da I4.0.

De acordo com a literatura, as tecnologias conceituadas da I4.0 são aplicadas para a manufatura industrial de produtos, operações de serviços, agricultura de precisão, saúde e área ambiental.

2.4 ECONOMIA CIRCULAR (EC)

O consumo crescente de produtos e serviços no planeta terra, indica uma tendência de escassez de alguns recursos utilizados nas cadeias de suprimentos para satisfazer as necessidades humanas futuras.

“Moraes (2000 apud Barbosa, 2015, p. 24), afirma que as atividades de forma acelerada e desordenadas, como extração, consumo e desperdício, causaram problemas de poluição, contaminação e acúmulo de lixo de todas as formas e a continuação desse cenário vai gerar esgotamento dos recursos naturais.”

Segundo Barbosa (2015), a sustentabilidade não pode se limitar apenas a meio ambiente. Ser sustentável está muito além de cuidar das questões ambientais do planeta. Ser sustentável é agregar vantagem competitiva em suas ações, com resultados positivos ao bem-estar da geração presente e preocupados com uma melhor qualidade de vida das gerações futuras.

O modelo de desenvolvimento econômico linear vem proporcionando a uma parte da sociedade humana o consumo de produtos com vida útil reduzida e descarte ao final do uso nem sempre de forma adequada ao ambiente, gerando os impactos ambientais por consumo desordenado e descartes incorretos.

“O modelo linear tradicional desencadeou muitas consequências ambientais negativas, como mudanças climáticas, poluição dos oceanos, perda de biodiversidade e degradação da terra.” (Khan, 2022, p. 1)

“A economia linear tradicional que usa um modelo de tirar-fazer-descartar é intensiva em recursos e tem impactos ambientais adversos. A economia circular (EC), que é regenerativa e restauradora por design, é recomendada como modelo de negócios para eficiência de recursos.” (Mboli, 2022, p. 772)

Segundo Bag (2022), a economia circular traz um conceito que permite a utilização otimizada de recursos para obter uma sustentabilidade futura.

“Uma economia circular é restauradora e regenerativa por design. Isso significa que os materiais fluem constantemente em um sistema de circuito fechado, em vez de serem usados uma vez e depois descartados.” (Arfelis, 2022, p.1)

“O aumento da competição econômica global e a crescente importância das questões ambientais forçam os fabricantes a considerar a implementação de cadeias de suprimentos de circuito fechado, garantindo a recuperação de produtos em fim de vida para reciclagem ou reutilização, porém estão sujeitos a muitas incertezas em seus fluxos, dadas as condições variáveis dos produtos fim de vida.” (Delpla, 2022, p1)

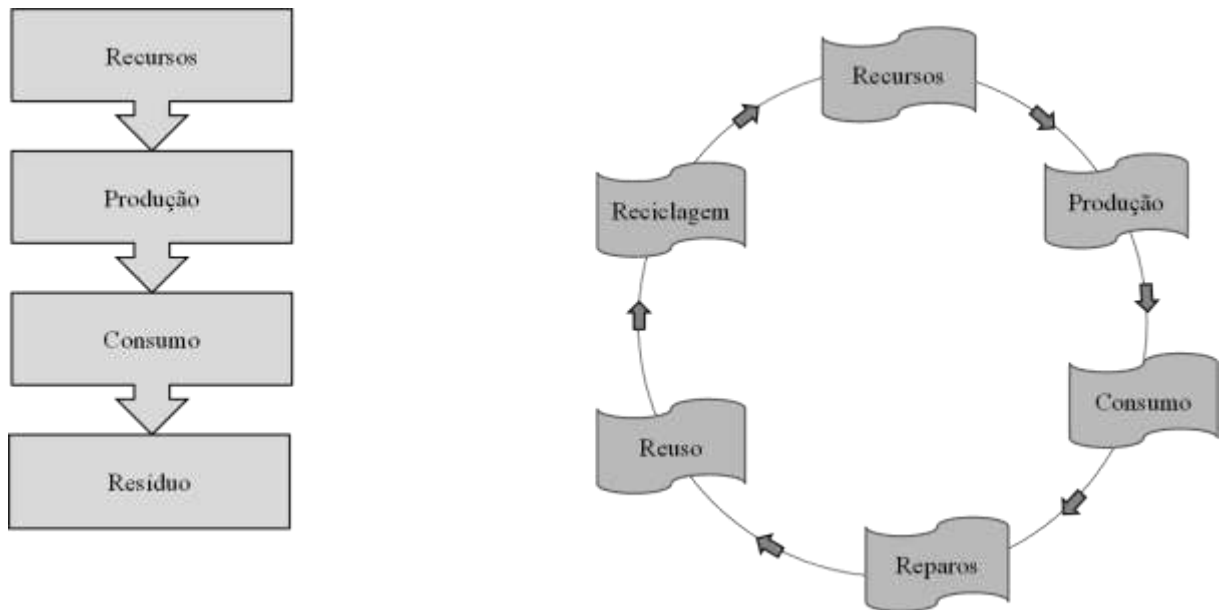
“No mundo da economia circular (EC), o design é uma ferramenta vital para transformar resíduos em riqueza, para aprimorar a reciclagem de materiais para novos produtos (por exemplo, design para modularidade, design para desmontagem, etc.”. (Ghoreishi, 2022, p. 1)

“A “desmanufatura”, desmontagem e remanufatura ainda é uma utopia e que sem ela a Economia Circular é deficiente e depende de eliminar as barreiras do pensamento do *design* de produto inicial e prever o final de vida do produto, da cultura das pessoas, da informação, do conhecimento, do custo e do uso de tecnologia futura para realidades futuras da E C. Segundo.” (Cappelletti, 2022, p. 1)

A economia circular apresenta os princípios de destino do que é produzido e como é descartado, estende a vida útil do produto desde a concepção de criação, permite reparos e manutenções para nova forma de consumo, aumenta a reciclagem dos componentes e materiais, otimizam os processos produtivos utilizando resíduos como recursos, utiliza água na forma consciente e utilização de energias renováveis, criando uma expectativa social de saúde e bem estar para a humanidade, otimizando resultados econômicos da empresa.

A Figura 4, resume a diferença entre a economia linear e a economia circular.

Figura 4 - Comparação entre Economia Linear e Economia Circular



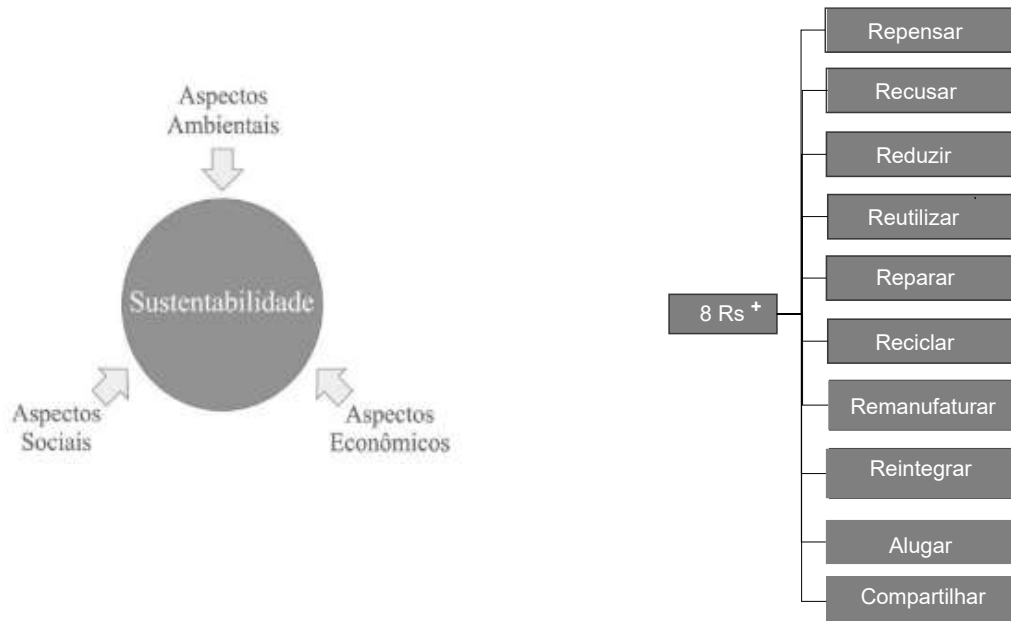
Fonte: Adaptado de Arfelis (2022) e Mboli (2022)

Dessa forma, muitas propostas do conceito de sustentabilidade e princípios 6Rs foram estudadas como base da alteração do modelo de produção linear para produção circular com objetivo de cumprir as metas futuras e não levar o planeta a um caos ambiental, e consequentemente social.

“O foco nos 6Rs, como Recuperar, Reutilizar, Remanufaturar, Reciclar, Redesenhar e Reduzir destaca as oportunidades disponíveis na transformação da economia linear para a economia circular, que melhora os direcionadores sociais, econômicos e ambientais da organização.” (Manavalan, 2019, p. 477)

A Figura 5, demonstra a base conceitual para atingir o ápice da economia circular (EC) considerando aspectos da sustentabilidade e os princípios do 8Rs⁺.

Figura 5 - Aspectos da Sustentabilidade e Princípios do 8Rs⁺.



Fonte: Adaptado de MANAVALAN (2019)

O equilíbrio da sustentabilidade é baseado no modelo triplo ambiental, econômico e social, mirando a conservação de recursos para gerações futuras e respeitando as condições ambientais e mantendo o social econômico.

Segundo Bakshi (2019), afirma que o ser humano depende bens e serviços econômicos, sociais e ecológicos.

São considerados bens econômicos matérias-primas, equipamentos, fornecimento de energia, mercado de produtos, tratamento de resíduos, alimentos, transporte.

Os bens e serviços sociais são trabalho, instituições educacionais, capital intelectual, sistema jurídico, governo e cultura.

Os bens e serviços ecológicos são os minerais, água, ar, luz solar, biomassa, alimentos, correntes oceânicas e fluviais, vento, polinização, solo, formação, sequestro de carbono, regulação de doenças.

Frequentemente chamado de “resultado triplo”, o triângulo da sustentabilidade demonstra a necessidade do equilíbrio ambiental, social e econômico, pois a sociedade necessita do uso de produtos e serviços que consomem energias e recursos naturais utilizados nas cadeias de suprimentos e produtivas.

Já os princípios do 8Rs⁺ demonstram que as empresas e a sociedade devem reduzir o uso de recursos naturais, reuso de produtos e materiais, reciclar produtos que são descartados, recusar a utilizar produtos que geram impactos poluentes negativos irreparáveis e repensar em

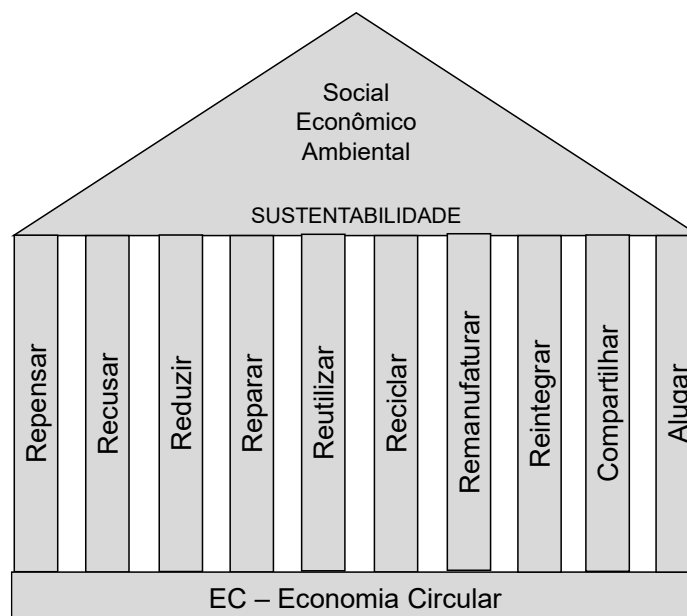
desenvolver produtos verdes ecológicos, possíveis de reciclagem, reúso e reparos completos ou parciais, remanufatura, reintegrar produtos biodegradáveis e incentivar a adoção de materiais que se reintegram ao meio ambiente após o descarte correto, além da possibilidade de compartilhar e alugar produtos, todos base da economia circular.

Com os princípios da economia circular (EC) a sociedade gera menor impacto negativo poluidor ao meio ambiente por consumismo e as empresas podem obter oportunidades de inovação em processos, produtos repensados para diminuir impactos ambientais, ampliações de negócios com práticas sustentáveis.

“Para superar o problema da escassez de recursos atualmente disponíveis no futuro, a estratégia ideal, surgindo sob a “bandeira” da Economia Circular (EC), seria manter os recursos relacionados ao produto, como material/energia etc., sempre em circulação de modo que o desperdício seja eliminado ou pelo menos minimizado. Como algumas indústrias já começaram a praticá-lo em nível global, a ideia subjacente por trás da EC é criar produtos duráveis, fáceis de reutilizar, remanufatura ou reciclado e, ao mesmo tempo, lucrativos.... Como algumas indústrias já começaram a praticá-lo em nível global, a ideia subjacente por trás da EC é criar produtos duráveis, fáceis de reutilizar, remanufatura ou reciclar e, ao mesmo tempo, lucrativos.” (Rizvi, 2021, p. 87)

A Figura 6, representa os pilares da EC para construção da Casa da Sustentabilidade.

Figura 6 - Pilares da EC para a Casa da Sustentabilidade



Fonte: Elaborado pelo Autor

A EC é uma estratégia ampla essencial para evitar mudanças climáticas ambientais, sociais que geram renda de forma direta e indireta às famílias, girando de forma mais limpa a economia das cadeias produtivas.

Outra questão da economia circular é referente ao uso da água e uso de energia nas cadeias produtivas e nas cidades para manter a infraestrutura.

O uso da água deve ser consciente quanto a evitar a escassez, preservação da vida na água, qualidade da água, saneamento de esgotos e realizar toda a ação de preservação de solo sem lixos, contaminantes inertes ou poluentes que são arrastados e geram impactos ambientais.

Quanto ao uso da energia é necessário a evolução para as energias renováveis limpas sem utilização de geração energia fóssil ou nuclear que são fontes de poluição graves que afetam o clima e o meio ambiente que vivemos com impactos negativos a humanidade.

Sempre o consumo de produtos e serviços estão entre as questões dos princípios da economia circular e as tecnologias oferecem a inovação da otimização no caminho da sustentabilidade entre as vantagens e equilíbrio.

2.5 LOGÍSTICA EMPRESARIAL INTEGRADA REVERSA

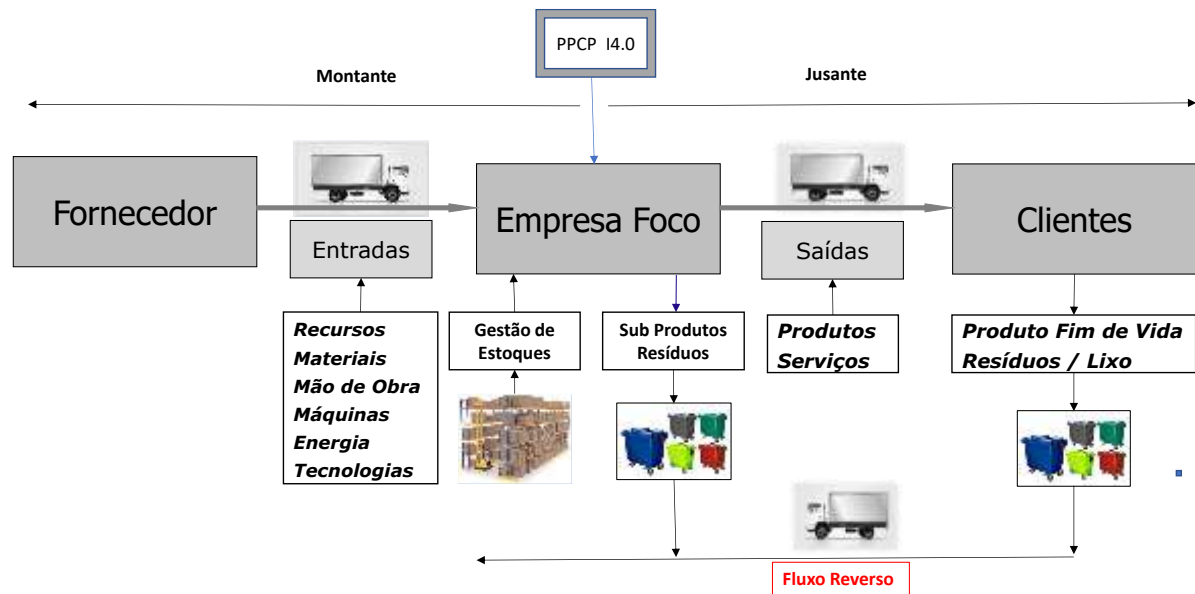
Na Logística Empresarial Integrada, inicia o fluxo em um fornecedor e movimenta no sentido do consumidor final.

Segundo Ballou (2009), a logística empresarial trata todas as atividades de movimentação e armazenagem que facilitam o fluxo de produtos desde o ponto de aquisição de matéria prima até o ponto de consumo final, assim como dos fluxos de informação que colocam os produtos em movimento, com o propósito de providenciar níveis de serviço adequados aos clientes a custo razoável.

As atividades da logística são representadas na cadeia de suprimentos para atender os indicadores de performance dos objetivos de nível de serviço.

A logística reversa trata do fluxo inverso, o início do fluxo ocorre nos clientes e retorna em contrafluxo para a mesma cadeia produtiva ou outra rede de negócios. A Figura 7, demonstra as atividades da logística empresarial e reversa na cadeia de suprimentos.

Figura 7 - Logística Empresarial e Reversa na CS



Fonte: adaptada de Ballou (2009)

Segundo Barbosa (2015), a logística reversa cuida dos fluxos de materiais que se iniciam nos pontos de consumo dos produtos e terminam nos pontos de origem, com o objetivo de recapturar valor ou de disposição final.

Logística reversa é a operacionalização de todas as atividades da logística na cadeia de suprimentos em fluxo contrário (montante) no sentido da origem utilizada para cumprir o fluxo inverso da logística normal, para a operacionalização e objetivos dos pilares da economia circular na cadeia de suprimentos sustentável.

As atividades da logística empresarial integrada são para a operacionalização dos processos no sentido do fluxo de produtos e serviços para atendimento ao nível de serviços dos clientes e são aplicadas em infraestrutura da Logística Reversa (LR) para alcançar os objetivos e operacionalização da EC para a sustentabilidade, conforme Tabela 2:

Tabela 2 - Atividades da Logística Empresarial Integrada e Logística Reversa

Logística Empresarial Integrada	Logística Reversa Integrada
<i>Nível de Serviço ao Cliente</i>	<i>Objetivos dos Pilares da EC a Sustentabilidade</i>
Colocação de pedido para aquisição de Insumos e produtos via tecnologias da informação.	Aviso de Resíduos, subprodutos e produtos fim de vida.
Transporte e distribuição de Insumos e Produtos na SC.	Transporte de destinação de resíduos, subprodutos e produtos fim de vida na SC.
Gestão de quantidade de Estoques de Insumos e Produtos na SC para entregas e distribuição de acordo com a demanda de consumo.	Gestão de estoques de resíduos, subprodutos e produtos fim de vida para operacionalizar a infraestrutura para operacionalizar o fluxo reverso.

Logística Empresarial Integrada	Logística Reversa Integrada
<i>Nível de Serviço ao Cliente</i>	<i>Objetivos dos Pilares da EC a Sustentabilidade</i>
Embalagem para proteção do produto e unitização de cargas para distribuição.	Coletores, caçambas, contentores, lixeiras para unitização de cargas para desmontagens, separação, remanufaturas, e destinação correta.
Manuseio e movimentação com equipamentos mecânicos, motorizados e automatizados das embalagens para estocagem e distribuição de produtos.	Manuseio e movimentação de coletores, caçambas, lixeiras com equipamentos mecânicos e motorizados de cargas para fluxo reverso para os pilares de EC.
Armazenagem e Estocagem das embalagens de Insumos e produtos para consolidação de cargas entregas e distribuição de acordo com os pedidos	Armazenagem e estocagem de caçambas com resíduos, subprodutos e produtos fim de vida para consolidação de cargas de acordo com avisos para transporte e destinação correta.
Programação de necessidades de materiais e fabricação de produtos de acordo com a demanda e colocação de pedidos de produtos.	Programação de coletas e transporte de Coletores, caçambas, contentores, lixeiras e distribuição correta de resíduos, subprodutos e produtos fim de vida na SC.
Obtenção e Compras de Insumos e materiais auxiliares de acordo com a programação e demanda de produtos da colocação de pedidos.	Comercialização de reciclagem, reúso, remanufatura, reparos ou destinação correta de resíduos, subprodutos e produtos fim de vida de acordo com o estoque da armazenagem.
Tecnologia da Informação aplicados em softwares de MRP e Tecnologias da I4.0 que otimizam e simulam os processos virtualmente para melhoria no nível de serviço e aumento de produtividade econômica.	Tecnologia da Informação e Tecnologias da I4.0 que otimizam e simulam os processos virtualmente da logística reversa e suas atividades para o meio ambiente e a sociedade com redução dos impactos de poluição e degradação.

Fonte: adaptada de Ballou (2009)

“Entendemos a logística reversa com sendo uma área da logística empresarial que planeja, opera e controla o fluxo e as informações logísticas correspondentes, do retorno dos bens de pós-venda e pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, por meio dos canais de distribuição reversos, agregando-lhes valor de diversas naturezas: econômicas, ecológico, legal, logístico, de imagens corporativas, entre outros.” (Leite, 2003, p.16 apud Barbosa, 2015, p. 31)

Com base em atividades da logística empresarial nas Cadeias de Suprimentos segundo Ballou (2009), adaptada para Cadeias de Suprimentos Sustentáveis, para atingir os objetivos da logística reversa é necessário operacionalizar a ordem de coleta (processamento de pedidos), coleção do estoque de resíduos e subprodutos (gestão de estoques), transportar no sentido reverso (transporte), local de armazenagem de resíduos e subprodutos (armazenagem), embalagens para colecionar os resíduos e subprodutos (embalagem), movimentar as embalagens com resíduos e subprodutos (manuseio de materiais), definição do local de uso,

reúso e destinação (obtenção), programação de coleta, tratamento do resíduo e subprodutos (programação de Produto) e tecnologias de comunicação de fluxo reverso das atividades (manutenção de informações).

Em questões como desenvolvimento sustentável, meio ambiente, ecologia, reciclagem, o cuidado que as empresas precisam ter com os resíduos produzidos na fabricação de seus produtos, são temas que não podem ser desvinculados da gestão moderna.

As atividades a serem realizadas no processo de logística reversa dependem do tipo do material e do motivo pelo qual estes entram no sistema.

Esta vertente da logística encontra-se em franco desenvolvimento, e é um grande potencial de negócio emergente para as empresas e organizações, pois as políticas ambientais tendem a ser cada vez mais exigentes. Outro fator de grande importância, e que está diretamente relacionado com o grande aumento da logística inversa é a compra de produtos através da internet, o chamado e-commerce.” (Carvalho, 2003, p. 71-72 apud Barbosa, 2015, p. 31).

A crescente conscientização dos consumidores com questões ambientais e o futuro do planeta, exigem que as empresas, governo, sociedade e indivíduos pensem em um novo modelo de gestão do fluxo reverso.

Essa nova sociedade faz com que se pense em novas estratégias de produção, não bastando apenas a competitividade do produto, mas o impacto que a fabricação dele provoca no meio ambiente.

“O aumento da velocidade de descarte dos produtos de utilidade após seu primeiro uso, motivado pelo nítido aumento da descartabilidade dos produtos em geral, não encontrando canais de distribuição reversos de pós-consumo devidamente estruturados e organizados, provoca desequilíbrio entre as quantidades descartadas e as reaproveitadas, gerando um enorme crescimento de produtos de pós-consumo. Um dos mais graves problemas ambientais urbanos da atualidade é a dificuldade de disposição do lixo urbano.” (Leite, 2003, p.21 apud Barbosa, 2015, p. 32)

No Brasil, a logística reversa de produto fim de vida foi institucionalizada pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que define a logística reversa como:

“Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.” (PNRS12305, 2010, p. 1)

A logística reversa está intimamente ligada às questões de sustentabilidade e preservação do meio ambiente, não desconsiderando o seu objetivo econômico.

“A existência de tecnologia adequada e economicamente viável, garantindo os processos logísticos e industriais nas diversas etapas dos canais reversos, é uma das condições básicas de estruturação e organização das cadeias reversas. A tecnologia uma vez voltada aos processos de gerenciamento dos fluxos reversos assume uma visão macro do produto e do processo de produção, atento a cada passo do seu

desenvolvimento evitando os impactos do mesmo para com o meio ambiente e a sociedade, antevendo possíveis danos que venham a causar e facilitando o seu retorno ao ciclo produtivo ou descarte”. (Leite, 2003, apud Barbosa 2015, p. 32)

A logística reversa é a principal operacionalização responsável das ações nos pilares da EC. Observa-se que no planejamento da maioria das empresas os canais de fluxo reverso não são assunto de grande relevância, isso se deve primeiramente pelo baixo retorno financeiro que esse recurso traz a princípio.

A logística reversa é a área do conhecimento que apoia e trata da destinação correta dos resíduos, subprodutos e produto fim de vida nas cadeias de suprimentos

Dessa forma, a logística reversa tem como objetivo, segundo Leite (2003 apud Barbosa, 2015), tornar possível o retorno dos bens ou de seus materiais constituintes ao ciclo produtivo ou de negócios, agregando valor econômico, ecológico, legal e de localização.

Ainda segundo Novaes (2004 apud Barbosa, 2015), a logística reversa tem dois objetivos distintos: o primeiro é recapturar valor e o segundo é oferecer disposição final.

Essas atividades visam as finalidades de: reciclagem, reprocessamento, reúso ou descarte. A reciclagem, reprocessamento e reúso é a transformação de resíduos e subprodutos para serem incorporados nos processos de fabricação de novos produtos.

O reprocessamento, tem como foco ampliar o ciclo de vida dos produtos ou embalagens e o descarte, aplica-se nos casos em que a reciclagem é antieconômica ou há excesso de oferta no mercado, mas este deve ser feito de forma segura para a população e o meio ambiente.

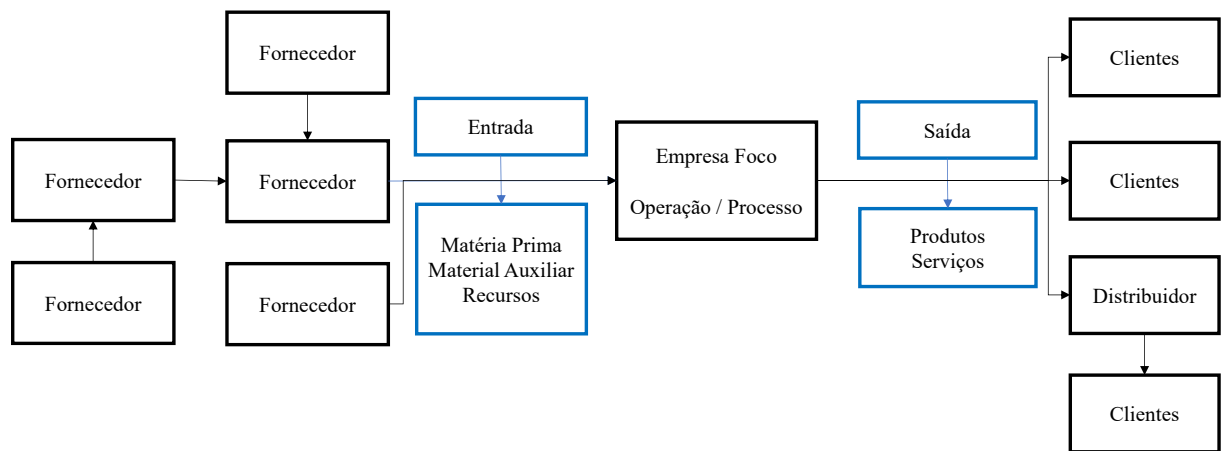
Há casos em que a reciclagem é feita por empresas terceiras, com objetivo de um novo processo produtivo, independente do fabricante e produto original.

2.6 CADEIAS DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS (CSS)

O conceito básico de uma cadeia de suprimentos é considerar que a sua extensão é desde o primeiro fornecedor do fornecedor, com entradas e saídas da empresa foco, até o distribuidor e o último cliente final que utilizou o produto ou o serviço do segmento.

A Figura 8, ilustra esse modelo de cadeia de suprimentos básica.

Figura 8 - Cadeia de Suprimentos Básica

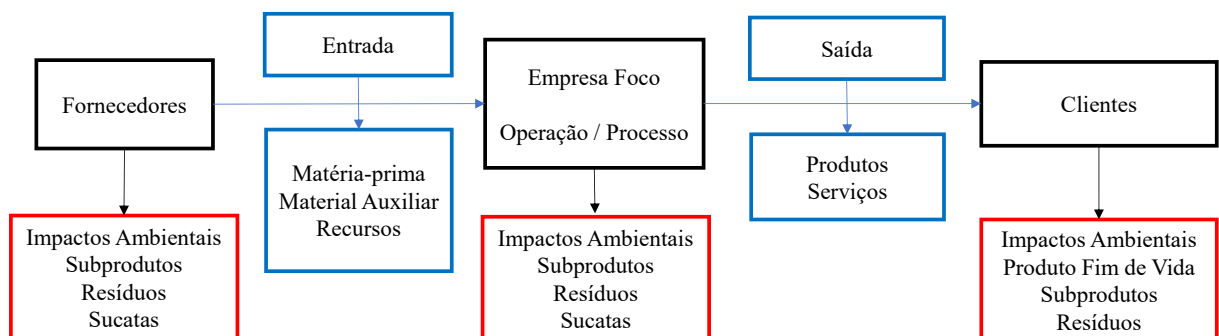


Fonte: Adaptada de Ballou (2009)

A cadeia de suprimentos sustentável consiste na gestão dos impactos ambientais das entradas de matéria prima, material auxiliar e recursos dos fornecedores, dos resíduos e subprodutos da operação na empresa, foco e dos resíduos, subprodutos e produto fim de vida dos clientes.

A Figura 9, ilustra uma cadeia de suprimentos sustentável com foco em gestão ambiental para busca constante das mitigações dos impactos negativos com base nos pilares e concepções da economia Circular (EC).

Figura 9 - Cadeia de Suprimentos Sustentável



Fonte: Elaborada pelo Autor (2023)

“O conceito de economia circular (EC) tem ganhado atenção significativa para lidar com os desafios da sustentabilidade na cadeia de suprimentos (CS). As práticas de EC oferecem abordagens inovadoras para otimizar vários processos de SC, levando ao crescimento sustentável. No entanto, a adoção de práticas de EC enfrenta muitos obstáculos onde a aplicação de tecnologias digitais disruptivas pode ser uma virada de jogo. A literatura existente carece de investigação sobre impulsionadores, facilitadores, barreiras críticas e desafios na adoção de tecnologias digitais disruptivas junto com práticas de EC em CS. A análise revela que as práticas de EC habilitadas para tecnologia digital ajudam a melhorar várias métricas de desempenho, como otimização de recursos, redução de desperdício, ciclo de vida do produto, saúde

ocupacional, desempenho social, segurança e qualidade do produto e fidelidade e satisfação do cliente.” (Agrawal, 2023, p. 1)

“O efeito direto das tecnologias de processamento de dados e tecnologias de fabricação inteligente na EC demonstra que a digitalização tanto do fluxo de materiais quanto do fluxo de informações permite que as empresas alcancem metas amplas de EC. Essas tecnologias digitais são as principais responsáveis por alterar o fluxo de informações dentro das empresas, que tem um papel central na EC: coletar e dominar dados em relação aos fluxos de materiais, recursos e resíduos, bem como o comportamento dos usuários sobre o uso do produto, é a nova fronteira para uma transição real e positiva para o paradigma da CE.” (Di Maria, 2022, p. 628)

Considerando a cadeia de suprimentos é necessário mensurar todas as operações de entrada no consumo de recursos, matéria prima e materiais auxiliares, as operações dos processos, a saída de produtos e serviços, os subprodutos e resíduos e o produto no final de vida.

Para a cadeia de suprimentos sustentável é necessário um planejamento de como alcançar os objetivos de ter um produto ou serviço com conceito de operação circular, com pilares da economia circular.

“A fabricação sustentável se estende além do processo de fabricação e do produto, incluindo a cadeia de suprimentos, em vários ciclos de vida do produto, bem como nas considerações de fim de vida. As empresas podem obter uma vantagem competitiva aplicando a fabricação sustentável para produtos e operações mais amigáveis ao meio ambiente.” (Jensen, 2017, p. 377)

O planejamento é desenvolver produtos e serviços que possam atender os requisitos de uso e reúso de recursos naturais, materiais com maior valorização, com menor consumo possível de energias e águas em processos, mitigando os impactos de poluição em solo, águas e ar em todas as operações no fim de vida do produto.

Segundo Arfelis (2022), uma economia circular é restauradora e regenerativa por design no desenvolvimento do produto. Isso significa que os materiais fluem constantemente em um sistema de circuito fechado, em vez de serem usados uma vez e depois descartados.

Os reparos e consertos para fazer o reúso diminuindo o consumo de novos materiais economizando os recursos naturais, energia e matérias é necessário ser analisado. E a reciclagem e destinação correta para diminuição do lixo residual em aterros buscando com as ações dos pilares de EC para a busca constante de uma produção limpa e circular em ciclos fechados buscando o uso das tecnologias da I4.0.

“A crescente consciência ambiental, a legislação mais rigorosa, a concentração urbana e o crescimento populacional contribuíram para a evolução do sistema de gestão de resíduos na China e à medida que suas cidades crescem rapidamente se esforçam para alcançar o *status* de classe mundial, o investimento em sistemas sustentáveis de gestão de resíduos urbanos em direção a um modelo de EC é

necessário para criar cidades ambientalmente amigáveis, habitáveis e sustentáveis.” (Kurniawan, 2022, p. 12)

As atividades da logística integrada de abastecimento, interna, distribuição e reversa é de fundamental importância na gestão da cadeia de suprimentos sustentável utilizando de tecnologias digitais e contribuição aos pilares da EC.

“O setor de logística desempenha um dos papéis mais importantes na cadeia de suprimentos com o objetivo de fornecer um desempenho rápido, flexível, seguro, econômico, eficiente e ambientalmente aceitável dos fluxos de carga e transporte. Além disso, a popularização do conceito de economia circular, usado para reter mercadorias, componentes e materiais em sua máxima usabilidade e valor em todos os momentos, ilustra a importância do desempenho adequado dos processos de logística reversa.” (Krstic, 2022, p. 1)

Para isso é necessário um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) com uso de tecnologias da I4.0 com base nos pilares da EC aplicados em cadeias de valor sustentáveis, empresas inteligentes sustentáveis, governos e sociedade sustentáveis.

A estratégia é planejar como alcançar os objetivos das cadeias de suprimentos sustentável na era da I4.0 e a EC.

“O conceito de Indústria 4.0 abre caminho para a economia circular, pois tecnologias digitais avançadas permitem iniciativas de sustentabilidade nas cadeias de suprimentos orientadas para EC e para I4.0, melhoram o desempenho sustentável, a flexibilidade, a operação e a interseção da I4.0 – EC. O gerenciamento da cadeia de suprimentos e técnicas quantitativas é uma área de pesquisa emergente digna de investigação. A análise bibliométrica destaca que a manufatura aditiva, a análise de big data e a Internet das Coisas são as tecnologias mais pesquisadas na interseção de EC e SCM sustentável. A avaliação das estruturas intelectuais, conceituais e sociais revelou que as operações e manufatura sustentável impulsionadas por I4.0 são campos de pesquisa emergentes.” (Hettiarachchi, 2022, p. 1)

É necessário pensar que o desenvolvimento dos pilares de EC em cadeia de suprimentos sustentáveis, principalmente no conceito de reciclagem, necessitam em alguns locais considerar quais impactos dos aspectos sociais também para conseguir equalizar.

Os aspectos econômicos das cadeias de suprimentos verdes podem trazer vantagens positivas empresariais e contribuir de forma direta ao meio ambiente.

“A importância de praticar uma economia circular para melhorar o desempenho da empresa, atrair mais empresas para se envolverem mais em práticas verdes e ajudar a resolver problemas de interrupção na cadeia de suprimentos. É hora de as empresas de manufatura se envolverem nas práticas da performance da Economia Circular para melhorar o meio ambiente, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e manter a segurança e a saúde pública. Além disso, quando essa prática começou a ser praticada na indústria manufatureira da Malásia, a empresa criou mais oportunidades de trabalho para aqueles com conhecimento e habilidades para gerenciar o sistema e formar diretamente uma equipe de melhor qualidade.” (Fernando, 2022, p. 19)

Segundo Langley (2022), cada negócio necessita analisar sua cadeia de suprimentos para a aplicação de um modelo de sistema digital e apresenta uma agenda de questões para serem desenvolvidas na prática a aplicação das tecnologias da I4.0 e a EC.

Espera-se que a interação Big Data-Indústria 4.0 revolucione as cadeias de suprimentos existentes nos últimos anos. Embora o aumento da eficiência operacional e o aprimoramento da tomada de decisões sejam as principais vantagens amplamente estudadas, os aspectos sustentáveis da cadeia de suprimentos digital na era da economia circular receberam atenção limitada.” (Patil, 2023, p. 1)

A integração entre a cadeia de suprimentos sustentável e a gestão do fim de vida dos produtos deve ocorrer de forma articulada com os princípios da Economia Circular (EC) e com a aplicação de tecnologias virtuais inteligentes. No entanto, observa-se que os esforços atualmente realizados ainda são, em grande parte, isolados e fragmentados, o que limita a eficácia e a eficiência dos resultados pretendidos nesse contexto.

2.7 CIDADES SUSTENTÁVEIS

As cidades inteligentes é o uso das tecnologias emergentes integradas para melhorar a qualidade de vida das pessoas e suas atividades do dia a dia, otimizando e tornando prática na infraestrutura, na segurança, no transporte, no convívio, na saúde, no acesso aos recursos e em toda a rotinas de vida de toda a sociedade e setores de apoio.

Mas podemos observar que as cidades sustentáveis necessitam manter toda otimização necessária para a qualidade de vida da sociedade e tornar integrada a sustentabilidade dos municípios colocando a questão ambiental, social e econômica de forma funcional no conceito *smart* com uso das tecnologias da I4.0 e pilares da EC.

No contexto das cidades inteligentes, a dimensão social da sustentabilidade ganha relevância ao promover inclusão, equidade e qualidade de vida no trabalho. Cooperativas, mulheres e trabalhadores inseridos nas cadeias de suprimentos desempenham um papel central nesse processo, especialmente quando engajados em práticas de economia circular. A valorização desses grupos fortalece redes locais de produção, fomenta o empreendedorismo social e contribui para a geração de trabalho digno e renda sustentável. Iniciativas que capacitam mulheres e trabalhadores em reutilização de materiais, logística reversa e inovação social fortalecem o tecido urbano sustentável.

Assim, a *IoT*, os *Smartphones*, as *RFID*, os bancos de dados, os sensores, a integração dos sistemas, a nuvem, a realidade aumentada e a inteligência artificial podem otimizar a gestão ambiental nas cidades para cumprir os pilares da EC perante governo, empresas e sociedade.

Ainda, as Cidades Sustentáveis podem aplicar conceitos para educação ambiental, sustentabilidade e pilares de EC e para cadeias de suprimentos a integração de banco de dados, com informações de descarte de subprodutos e reciclagem.

As cidades sustentáveis, necessitam fazer o uso das tecnologias da I4.0 para estruturar e operacionalizar as atividades dos pilares da EC, realizando planejamento e planos de ações para melhorar os indicadores ambientais, sociais e econômicos, melhorando a qualidade de vida e alcançando a real sustentabilidade.

“O investimento em iniciativas de cidades inteligentes pode aprimorar o planejamento, a capacidade de preparação e a capacidade de resposta às pandemias globais que exigem ações oportunas e integradas e a disponibilidade e aplicação adequada de tais tecnologias podem contribuir para a digitalização de resíduos na era do 4IR, atuando como é uma força motriz, ajudando-a a avançar em direção a estratégias de desenvolvimento de baixo carbono na estrutura da CE.” (Kurniawan, 2022, p.12)

Outro ponto importante é o uso de redes sociais para o endo marketing digital sustentável engajando a educação ambiental e a real solução de problemas para se obter a sustentabilidade.

A aplicação do sistema de gestão de I4.0 e EC tem sugestão de cidades inteligentes sustentáveis aplicando o sistema e podendo integrar em regiões maiores saindo de um sistema micro para macro.

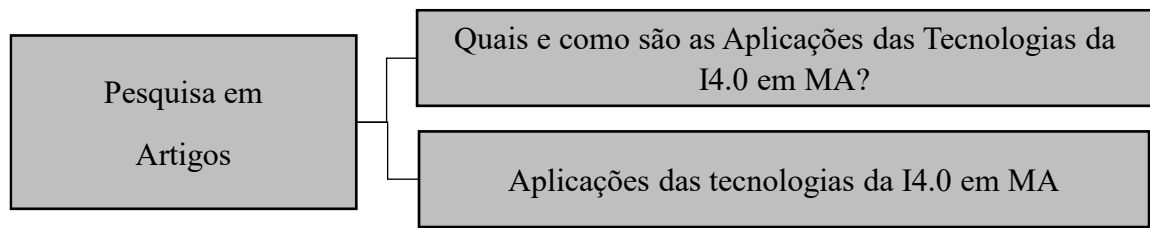
2.8 TECNOLOGIAS DA I4.0 EM MONITORAMENTO AMBIENTAL

Para conceituar e apresentar as aplicações das tecnologias da I4.0 em Monitoramento Ambiental (MA), foi realizada uma pesquisa de levantamento bibliográfico em artigos de base científica.

A escolha por uma pesquisa somente em artigos científicos deve-se ao fato de ser uma abordagem recente no que se refere às propostas de aplicação prática das tecnologias da I4.0 na área ambiental. Além disso, essa pesquisa permite uma abrangência mundial, reunindo relatos de aplicações em estudos acadêmicos e empíricos.

Foram realizadas análises detalhadas de artigos publicados em um período específico, com foco nas tecnologias da I4.0 aplicadas em Monitoramento Ambiental (MA). A Figura 10 ilustra a estrutura proposta na questão da pesquisa:

Figura 10 - Estrutura da Pesquisa I4.0 em MA



Fonte: Elaborada pelo Autor (2023)

Q1: Quais e como são aplicadas as tecnologias da I4.0 em Monitoramento Ambiental?

A pesquisa bibliográfica respondeu à questão sobre quais as tecnologias da I4.0 são aplicadas em Monitoramento Ambiental (MA) e como essas tecnologias são utilizadas. Ela foi realizada com base em artigos científicos relacionados ao tema do projeto, delimitados ao período de 2010 a 2024, utilizando a base Scopus como fonte única, sem duplicações em outras bases, o que foi suficiente para analisar a tendência das aplicações.

Foram utilizadas as palavras-chave "*Industry 4.0*" e "*Environmental Monitoring*" para a busca, considerando título, resumo e palavras-chave, a fim de direcionar análises relacionadas à aplicação de I4.0 na área ambiental.

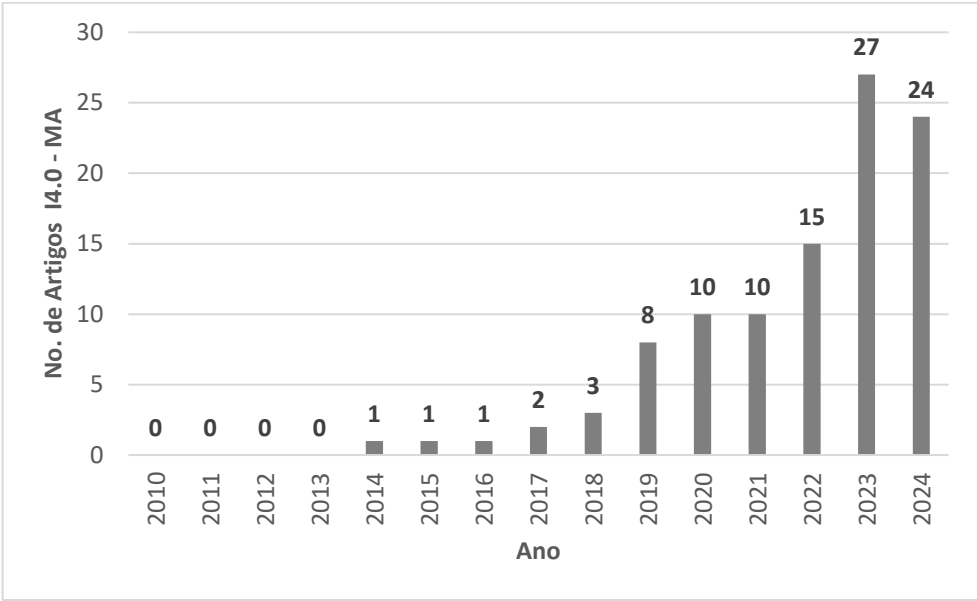
Após o levantamento inicial, ocorreu a leitura dos resumos e a análise detalhada, selecionando artigos que abordassem a relação entre as tecnologias da I4.0 e o Monitoramento Ambiental. Esses artigos foram citados, comentados e referenciados no texto e na bibliografia.

Os critérios de inclusão consideraram a tendência e o uso de Tecnologias da I4.0 em MA, avaliando a importância das citações e a relevância do conteúdo ao tema em revistas voltadas para as áreas de Ambiental, Sustentabilidade, Química, Biotecnologia, Poluição, Sensores, Software, Computação e Produção Sustentável.

Artigos que mencionaram o uso de recursos da I4.0 apenas para otimização industrial, sem abordar o conceito de sustentabilidade, foram descartados.

O levantamento resultou na seleção de 102 artigos publicados entre 2014 e 2024, conforme demonstrado no Gráfico 1. Esses artigos serviram como base para os resultados obtidos na pesquisa aplicada.

Gráfico 1 - Número de Artigos I4.0 - MA / Ano



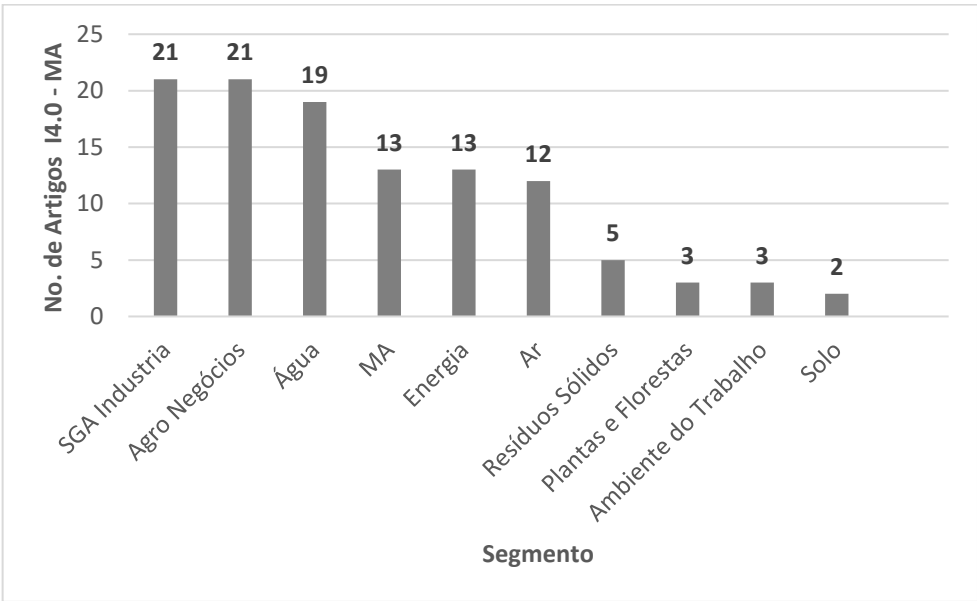
Fonte: Autor 2025

Observou-se que os artigos publicados começaram apenas em 2014 e demonstram uma tendência crescente no uso das tecnologias da I4.0 em Monitoramento Ambiental (MA). A maioria das publicações (94 de 102, ou 92,2%) ocorreu a partir de 2019.

Dos 102 artigos selecionados para a pesquisa aplicada, os resultados mostraram que as tecnologias da I4.0 são amplamente aplicadas em diversos segmentos relacionados ao MA.

O Gráfico 2 apresenta a distribuição do número de artigos por segmento.

Gráfico 2 - Número de Artigos I4.0 - MA / Segmento

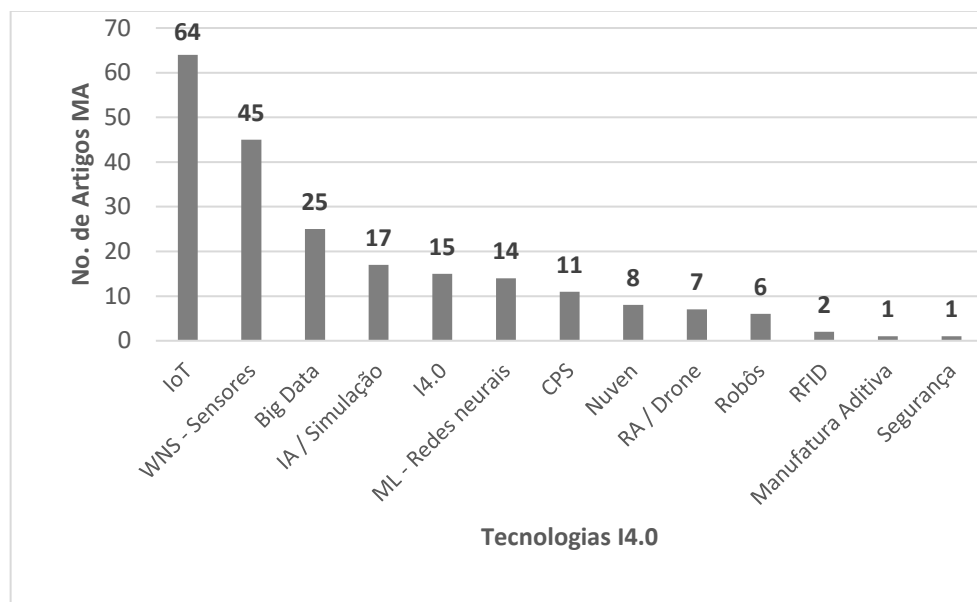


Fonte: Autor 2025

Observou-se que os artigos publicados sobre o uso de tecnologias da I4.0 são amplamente aplicados em vários segmentos da área ambiental, com destaque para os Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) nas indústrias, agronegócios voltados ao controle e otimização de processos, monitoramento de recursos hídricos, Monitoramento Ambiental (MA), monitoramento e controle de energias para otimização de resultados econômicos e ambientais, monitoramento da qualidade do ar, gestão de resíduos sólidos e lixo, monitoramento de plantas e florestas, supervisão de ambientes de trabalho e monitoramento de solos.

Além disso, as tecnologias mencionadas nos artigos frequentemente combinam mais de uma solução integrada para atender às necessidades específicas de cada segmento de monitoramento ambiental, conforme detalhado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Número Artigos MA e Tecnologias I4.0



Fonte: Autor 2025

Observa-se que as tecnologias mais frequentemente combinadas e aplicadas na I4.0 em Monitoramento Ambiental (MA) incluem Internet das Coisas (*IoT*), Redes de Sensores Sem Fio (*WNS*), *Big Data* acessível, Inteligência Artificial (*IA*), simulação, aprendizado de máquinas (*Machine Learning*), sistemas Ciberfísicos (*CPS*) integrados a redes sem fio, armazenamento em nuvem (*Cloud*), Realidade Aumentada, drones e robôs.

Quais e como são as aplicações dessas tecnologias em Monitoramento Ambiental (MA) são citadas, descritas e referenciadas.

Primeira publicação na base da pesquisa de tecnologias da I4.0 e monitoramento ambiental citadas no 4º e 5º workshop de segurança de dados da *CPS* afirma que:

Espera-se que Internet das coisas (*IoT*) conecte perfeitamente tudo, todos e traga a promessa de ambientes inteligentes, indústria 4.0, gerenciamento de infraestrutura

inteligente, monitoramento ambiental e recuperação de desastres, etc.” (Armknacht, 2014, p. 1), e, “haverá uma estimativa de 20 a 30 bilhões de dispositivos nas *IoT* interconectados até o ano de 2020.” (Katzenbeisser, 2015, p. 1)

Tang (2016), afirma que tecnologias da I4.0 é uma vontade na produção, controle e monitoramento ambiental na agricultura utilizando de dispositivos conectados a *IoT*, informação de dados em tempo real para um *Big Data* controlando o ambiente e melhorando a qualidade da agricultura.

A I4.0 aborda processos digitais com uso de tecnologias e Gregori (2017) afirma que as fábricas buscam mais eficiência em termos de custos e “pegada” ambiental. Mas é importante usar os recursos para monitorar também o pilar social, supervisionando o trabalho com uso de sensores inteligentes no processo, uso de *IoT* e banco de dados para tomada de decisão e ações corretivas.

Chang (2017, p.1) afirma que a “Indústria 4.0 está ganhando mais atenção do público e a correlação entre fábricas e fontes de poluição ambiental próximas é um assunto que merece uma pesquisa aprofundada.”

Garrido-Hidalgo (2018), apresenta em seu estudo uma pulseira inteligente de conexão entre máquina e o homem para monitorar a atividade laboral e a segurança do trabalho utilizando sensores, *IoT* e banco de dados.

Mohan Kumar (2018, p.1), afirma “que recursos da I4.0 denominado *IoT* são utilizados atualmente em diversas áreas em supervisão ambiental e que os dados podem ser atacados.”

A conectividade da internet para Sonawala (2018) é o uso de *IoT*, *CPS* e *Cloud* para obter monitoramento e controle de dados industriais ambientais de diferentes plantas, tais como temperatura, umidade e pressão utilizando dispositivos móveis e salas de controle.

Segundo Braccini (2019), existem poucas pesquisas empíricas que abordam o impacto da I4.0 na dimensão social, econômica e ambiental da sustentabilidade. O estudo de caso demonstra que o uso da tecnologia da I4.0 melhora a produtividade e a qualidade do produto (econômico), monitoramento contínuo do consumo da energia (ambiental) e o monitoramento da carga do trabalho (social).

Em gerenciamento do uso da água, Bekic (2019) apresenta em seu artigo possibilidades de ideias aplicadas em sistema integrado de informações do uso da água. Os exemplos envolvem as tecnologias da I4.0 de *IoT*, *Cloud* e *Big Data* com dados sendo coletados em tempo real por sensores. O gerenciamento, monitoramento e controle são para gerenciar várias características da gestão do consumo do uso da água nas residências, na agricultura de precisão, monitoramento de inundações urbanas e condições da água dos oceanos.

Na silvicultura, Valentini (2019) desenvolveu um sistema de coleta com sensores e transmissão de dados com *IoT* para monitorar o transporte de água nas árvores, crescimento diametral, características das folhas e parâmetros microclimáticos. Esse sistema de dados colabora diretamente com gestão de infraestrutura verde urbana e pesquisas ecológicas.

Para monitoramento da fauna marinha, Schleyer (2019), afirma que os recursos da I4.0 podem ser utilizados para informações úteis de avistamento geográfico localizado para preservação da vida das espécies. O sistema de rede com sensores sem fio (Smartphone), uma base de internet e interação da Internet Social das Coisas – *SIoT* demonstram muitos relatos contribuídos para a preservação de estudos científicos das regiões.

Na coleta de lixo domésticos das cidades para reciclagem e destinação correta, Bányai (2019), utiliza de um Sistema *Cyber Physical* – CPS da RI 4.0 para coleta de resíduos e otimização em seus processos. O monitoramento e controle otimiza as rotas de coleta do transporte, agendamento e coleta potencial de lixo.

A proposta de Tseng (2019) é usar o recurso de inteligência artificial para reduzir os desperdícios e os impactos poluentes gerados na cadeia de abastecimento alimentar, buscando aplicar os conceitos de EC.

Para agricultura inteligente, denominada de *Smart*, Valecce (2019), afirma que os recursos da I4.0 serão promissores com utilização de *IoT*. Que em função das mudanças climáticas é muito importante o monitoramento contínuo dos parâmetros ambientais e a automação dos processos para otimização da produção alimentar. Propõe um modelo conceitual e o projeto que detecta parâmetros do solo significativos utilizando placas fotovoltaicas e sensores, enviam os dados para tomada de decisão autônoma e impulsiona fertilização e irrigação com uso da *IoT*.

Em dois estudos de casos aplicados na Espanha, Plehiers (2019) afirma que a qualidade do ar tem impacto significativo na saúde humana e utiliza de recursos da I4.0 para monitorar e controlar a poluição interna do ar. Após identificar uma lacuna de análise de dados, testar um sistema de baixo custo que monitora em tempo real a longo prazo utilizando sensores, *IoT* e banco de dados para análise da qualidade do ar interno.

Em monitoramento da qualidade do ar da atmosfera, Duisebekova (2020) desenvolve um sistema de cálculo da poluição com uso de recursos de redes sem fio e banco de dados (*big data*) remotos para previsões futuras e tomadas de decisões para qualidade do ar e do meio ambiente.

O sistema de monitorar a qualidade do ar da atmosfera, prever e analisar em tempo real de Pyagay (2020) busca evitar consequências à saúde humana. O sistema é de baixo custo, coleta em várias estações através de sensores e envia os dados a um servidor (*Big Data*) com acesso *online* via web e aplicativos móveis.

Uma revisão sistemática da literatura, publicado por Colpas (2020), apresenta resultados de artigos publicados utilizando *IoT* para monitoramento de aquíferos demonstrando a importância do uso de tecnologias em monitoramento. “Aplicações que permitem interação hardware e software para apoiar tomada de decisão em aquíferos”.

Na piscicultura, foi aplicado por Gorbunova (2020) tecnologias digitais da I4.0 no processo de criação de peixes em lagoas de fazendas aumentando a produtividade e os ganhos. O sistema com energia solar e Sensores de densidade da água, temperatura da água e do ar, teor de oxigênio dissolvido e ingestão de rações ligadas a um alimentador flutuante foi automatizado com *IoT* para alimentação autônoma utilizando comunicação sem fio.

Na automatização da agricultura, Katangle (2020) propõe e aplica um hardware com custo reduzido baseado em *IoT* bidirecional com comando de voz. Os dados dos sensores de umidade do solo, temperatura e umidade do ar são armazenados em nuvem e têm o controle de água por comando de comunicação via central de internet a distância.

O monitoramento da qualidade do ar é muito importante em relação ao perigo para a saúde humana, e Lin (2020) cita o desenvolvimento de sensores e *IoT* para monitorar os gases em garagens subterrâneas de estacionamento dos grandes centros com novo conceito de cidades inteligentes e recursos tecnológicos da I4.0.

Em cultivo de morangos, Juan Carlos (2020) usa de recursos de *IoT* e sensores de temperatura, umidade relativa e Ph com informações de dados em tempo real para monitoramento da produção.

Na gestão de resíduos, o estudo de caso especificamente da sucata de metal nas empresas, Mastos (2020) propõe um modelo de comunicação de dados via *IoT* e controle para organizar uma gestão mais sustentável com recursos da I4.0. O modelo inclui os processos de coleta, comunicação, limitações de mercado e a implantação de uma solução de última geração da indústria 4.0 para a negociação da sucata produzida e a sustentabilidade, gerando redução de emissões de CO₂, disponibilidade de recursos e otimização do tempo de resposta.

Para (Manavalan et al., 2019 apud Mastos, 2020, p. 12), “demonstram que as soluções da Indústria 4.0 têm potencial para melhorar, entre outros, a sustentabilidade econômica, ambiental e social na gestão da cadeia de suprimentos.”

Na área industrial o uso da I4.0 para avanço da produção sustentável em estudo de Esmaeilian (2020), apresenta uma visão geral do uso dos recursos da I4.0 no “(1) gerenciamento de energia habilitado para Internet das Coisas (*IoT*) em fábricas inteligentes; (2) logística e transporte inteligentes; e (3) modelos de negócios inteligentes.” Aplica e usa também em blocos o banco de dados para aumentar a sustentabilidade, em quatro áreas principais: “(1) design de mecanismos de incentivo e tokenização para promover o comportamento verde do consumidor; (2) aumentar a visibilidade em todo o ciclo de vida do produto; (3) aumentar a eficiência dos sistemas enquanto diminui os custos operacionais e de desenvolvimento; e (4) promover o monitoramento da sustentabilidade e o desempenho de relatórios nas redes da cadeia de suprimentos”

Uma otimização do uso da água em irrigação de gramados ornamentais, descrito por Winkler D. A. (2020), utiliza de um sensor de umidade e um controle que aprimora a eficiência e a sustentabilidade. Neste caso está utilizando sensores, *IoT*, Banco de dados e Aprendizado na otimização do uso racional da água na I4.0

Em monitoramento das florestas, Sahal (2021), correlaciona a I4.0 com Floresta 4.0, afirmando em estudo de caso a aplicação das tecnologias para manejo florestal eficiente e sustentável. É distribuído dispositivos inteligentes e integrados a *IoT* para coletar dados e identificar incêndios.

Possibilidades para tecnologia da I4.0, Winkler, R. (2021), em seu estudo desenvolve kits de hardware simples integrados a *IoT* com uso de mini placas com sensores analógicos de baixo custo e códigos abertos com possibilidade de monitoramento do ar, água e solo possibilitando controle em agricultura e indústria.

Segundo Ferrari (2021), a I4.0 e as tecnologias possibilitam monitorar, integrar e rastrear processos por meio de sistemas digitais. O sistema combina sensores, controladores, informações e banco de dados para melhoria contínua da planta de produção e sustentabilidade dos processos.

Nur-A-Alan (2021) afirma que o desafio da I4.0 em monitoramento remoto utilizando *IoT* é confiabilidade em longa distância e seu estudo desenvolveu um modelo eficaz de controle de energia utilizando um aparelho celular inteligente, sensores e microprocessador com comunicação de longa distância.

O setor de manufatura exige produção sustentável, sem ignorar aspectos ambientais e econômicos. Em seu estudo de caso, utiliza de conceito de manufatura enxuta, I4.0 e suas tecnologias para monitoramento e controle do processo produtivo reduzindo desperdícios e

emissões que impactam o meio ambiente. Ainda afirma que “a RI 4.0 trouxe uma mudança de paradigma no cenário de manufatura, mas ainda há escassez de abordagens que combinam os conceitos de manufatura enxuta, manufatura ambientalmente consciente e Indústria 4.0.” (Amjad, 2021, p. 12)

Utilizando de drones e internet inteligente, Alsamhi (2021) afirma que veículos aéreos não tripulados utilizam recursos tecnológicos da I4.0 avançados e promissores, tais como *IoT* e 5G que pode melhorar drasticamente a qualidade de vida das pessoas, a inteligência das cidades e aumentar a eficiência econômica geral, permitindo suporte a muitas aplicações, como vigilância, agricultura, comunicação, transporte, monitoramento de poluição, gerenciamento de desastres, segurança pública, saúde e preservação ambiental.

Segundo Facchini (2021), os resíduos sólidos urbanos são um dos principais problemas ambientais e a I4.0 com uso de *CPS* e *IoT* permite operacionalização de cidades inteligentes. O estudo propõe um controle da capacidade de lixeiras inteligentes e momento exato de coleta otimizando a roteirização utilizando *WSN (Wireless Sensores)*, *CPS* e *IoT*.

Para Shahrani (2021), a tecnologia I4.0 com aplicação de Robô, Sensores sem fio, IOT e Cloud é essencial para monitoramento das águas e da vida aquática. Com uso da I4.0 desenvolveu um robô autônomo movido com energia de placa solar acoplada, multissensorial que coleta em tempo real temperatura, Ph, voltagem e lixo para análise e monitoramento da qualidade da água. O teste do robô conseguiu coletar dados em tempo real sem interferência humana. Essa tecnologia no futuro pode permitir analisar dados compartilhados e resolver problemas da água, um requisito de sobrevivência do planeta.

Nas indústrias de bebidas e alimentos, Watson (2021), descreve que esses fabricantes utilizam muitos recursos naturais, geram emissões e resíduos e que o uso das tecnologias da I4.0 nesse segmento com aplicação de Sensores e *Machine Learning* permite um controle e um monitoramento para análise de dados e tomadas de decisões mais eficientes para reduzir o impacto ambiental.

Para García-Muiña (2021), a era digital e as tecnologias da I4.0 podem contribuir para monitorar a sustentabilidade pouco estudada na indústria manufatureira. Em seu estudo demonstram que a digitalização dos processos produtivos, além de possibilitar a avaliação do impacto ambiental, pode desempenhar um papel fundamental no conhecimento do desempenho social de uma organização.

Na agricultura, área de muita importância para a sustentabilidade do planeta, Singh (2022) afirma que o desenvolvimento de dispositivos e sensores sem fio baseados na *IoT* podem

monitorar e controlar com precisão o ambiente ecológico da agricultura com mínimo impacto ambiental. A tecnologia da I4.0, que ainda enfrenta desafios e cria oportunidades, pode alcançar uma agricultura de precisão monitorando e controlando a preparação do solo, semeadura, verificação do estado da cultura, identificação e detecção de pragas e insetos, irrigação, pulverização de fertilizantes e colheita.

Na Indústria de alimentos, Kumar (2022), afirma que os aplicativos da I4.0 podem ser usados para rastreabilidade, rastreamento, inspeção, monitoramento de qualidade, monitoramento ambiental, agricultura de precisão, otimização de insumos agrícolas e automação de processos etc., para melhorar a circularidade e a sustentabilidade.

Em função de mudanças climáticas e pandemias globalizadas, Shilin (2022), propõe-se usar as ferramentas digitais da I4.0 de suporte de geoinformação para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. O estudo é criar uma base metodológica para a construção de ferramentas digitais de apoio à geoinformação para a gestão integrada dos recursos hídricos utilizando os métodos de tomada de decisão em condições de incerteza e ferramentas digitais de plataformas online distribuídas com novos conceitos em obtenção e apresentação de dados, que integram recursos heterogêneos de hardware e software.

Na Avicultura Bumanis (2022), cita que principalmente em funções de diretrizes da União Europeia, para controle de emissão de gases do efeito estufa CO₂ (dióxido de carbono) e NH₃ (amônia) é tendência e necessário uso da tecnologia I4.0 para monitoramento em tempo real dos gases. Aplicou um estudo de caso em uma fazenda de criação de aves utilizando sensores de coleta de dados da emissão de gases, *CPS (5G), Cloud, IoT, Data Security* que são analisados em uma central por um sistema inteligente para garantir os limites de emissão de gases dentro dos limites e otimização de resultados operacionais.

Na área de agricultura de frutas, Occhiuzzi (2022) descreve que o controle das condições ambientais e controle de gases em câmaras usando a tecnologia I4.0 é muito importante para monitorar o amadurecimento e a qualidade desses produtos. Indica que o uso de *RFID – Radio Frequency Identification e SVM - Support Vector Machine* aliado a um algoritmo de classificação automática e máquina treinada consegue analisar o estágio de maturação com precisão superior a 85%.

Segundo Bradu (2022), é necessário uso de *IoT* e Sensores para desenvolver tecnologias inovadoras verdes que englobam produtos corretos ecologicamente e segurança ecológica por meio de monitoramento e controle ambiental do ar, água, solo e espécies.

Para Thakur (2022), o monitoramento da qualidade da água tornou-se crítico para garantir água limpa e segura de aquíferos naturais para analisar a evolução dos contaminantes ao longo do tempo e se torna importante mudar de uma análise de água tradicional com várias etapas, testes laboratoriais complicados e instrumentos caros para implantar sistemas técnicos portáteis e de fácil utilização para monitoramento de fontes de água em tempo real ou no local, utilizando *IoT* e alinhamento a I4.0.

No artigo Kychkin (2022), desenvolveu através de diagrama de blocos plataformas integradas de *IoT*, *Big Data*, *Machine Learning* para monitorar, controlar e gestão do impacto de emissões atmosféricas Industrial com análise estatística *online* e previsão dinâmica da poluição, bem como a regulação automática dos processos tecnológicos de acordo com critério de segurança ambiental. Foi instalado os analisadores de gás para medição bruta de poluentes em uma plataforma integrada localizada em rede ou nuvem de internet da empresa acumulando informações com aprendizado da plataforma para recomendações de ajustes automáticos e otimização de emissões. Os autores denominam como um analista ambiental tecnológico onde os dados estão condensados e armazenados com diversos tipos de relatórios para tomada de decisão e correções preventivas.

No artigo de Mboli (2022), o modelo economia circular (EC) em relação a economia linear (EL) pode ser ampliado em escala com suporte e uso da tecnologia I4.0 para cumprir metas futuras de sustentabilidade do planeta nos negócios empresariais em função do crescimento populacional e necessidade produtiva. A tecnologia pode ser um facilitador para rastrear, monitorar e analisar o valor residual dos produtos em tempo real para motivar as empresas a buscarem decisões de circularidade. O uso de *IoT*, *CPS*, *5G*, *Cloud Manufacturing and Additive Manufacturing* e Sistema de Suporte de Decisão, pode eliminar barreiras para definir o valor residual, dificuldade em coletar, destinar e propõe monitorar o produto em tempo real na CSC Cadeia de Suprimentos Circular.

Na revisão sistemática da literatura de Majid (2022), pode se observar no artigo a afirmação que a I4.0 no século XXI revoluciona com uso de tecnologia *IoT* e *WSN* para uma automação, controle, processamento de dados extraídos em locais remotos. Essa tendência e revolução tecnológica de *IoT* e *WSN* podem ser utilizadas para monitoramento ambiental, agricultura de precisão, controle de energia, controle de poluição, detecção de ataques químicos e biológicos.

Nas empresas, uma das preocupações recentes segundo Waters (2022), é como contribuir com a sustentabilidade ambiental e reduzir custos em seus processos produtivos. Em

seu artigo apresenta uma aplicação com sensores e *IoT* para medir resíduos de gás em seu processo e ter dados para supervisão para tomar decisões de otimização dos processos.

No segmento da construção civil, Yousif (2022) afirma que práticas tradicionais geram trabalhos intensivos com alto consumo de energia, poluição ambiental e baixa produtividade na execução dos projetos e recomenda uso de tecnologias da I4.0 para sustentabilidade. O artigo faz uma revisão crítica da literatura de estudos na área e um painel com aplicação da tecnologia virtual para decisões na construção civil.

Para Schneider (2022), a modelagem matemática e a simulação são ferramentas indispensáveis para apoiar instalações de recuperação de recursos hídricos para a sustentabilidade. Os modelos mecanicistas são bem aceitos, mas podem se utilizar de tecnologias digitais da I4.0 para coletar informações e obter dados para uma melhor interpretação híbrida.

Segundo Oliveira Ramos (2022), para manter a qualidade da água e da biota é essencial o monitoramento de sólidos totais suspensos e sedimentáveis. Porém a análise em laboratório e o resultado é trabalhoso, demorado e com alto custo. Os autores desenvolvem um instrumento validado, preciso e analítico equipado com um amostrador automático e um software para captura de filme digital em tempo real que analisa por cores a quantificação de sedimentos. O instrumento reduziu o tempo de análise e o custo aplicando os recursos tecnológicos da I4.0.

Lemos (2022), em seu artigo, aborda o projeto de um sistema de monitoramento individual em tempo real de um ambiente em uma indústria utilizando sensores e *IoT*. Os sensores medem nível de poeira, ruído, radiação ultravioleta, iluminação e umidade, agentes de riscos à saúde do trabalhador.

Segundo Boiar (2023), afirma recomendação para utilizar tecnologias modernas de comunicação e avaliação, pode ser desenvolvido um biorreator “inteligente” usando redes neurais, que avalia o crescimento de algas em tempo real, realiza adaptações de processos e, assim, acelera significativamente o crescimento e a expansão de algas. Para aprender (*Maschine Learning*) o comportamento das algas na menor série possível de experimentos em intervalos de mudança repetitivos. Foram executados testes variando sistematicamente os parâmetros ambientais e foram treinados para modelar o crescimento de algas. O mecanismo de atenção é usado na direção variável e temporal por importância. Com base nos modelos treinados, o comportamento do crescimento das algas é interpretado.

Novosjolov (2023), realiza uma revisão de artigos sobre implementação de tecnologias da I4.0 e IA aplicadas em sistemas de abastecimento de água, a relevância das questões

relacionadas à conservação de recursos e ao monitoramento ambiental. As tecnologias de inteligência artificial mais populares entre os artigos estudados foram algoritmos de classificação e agrupamento, redes neurais e algoritmos genéticos e de conjunto. Essas tecnologias são usadas para processar big data para previsão e otimização.

Na Índia, Shende (2023) afirma a importância do uso da tecnologia (*IoT*) para eliminar a causa raiz do fracasso na agricultura, onde as culturas não recebem nutrição adequada, o que resulta numa quantidade mínima de produção e perda de culturas. A abordagem sugestiva é projetar e implementar um mecanismo robótico que mantenha registros da saúde das plantas e das condições ambientais, o uso eficaz de pesticidas conforme a necessidade, monitoramento em tempo real de chuvas suficientes, o abastecimento de água e melhor conhecimento do processo de fertilização adequado à fertilidade da terra.

Segundo Dhanasekar (2023), vários smartphones são usados ativamente para controlar eletrodomésticos ou escritórios com dispositivos da Internet das Coisas (*IoT*). O artigo apresenta um sistema de automação inteligente que utiliza tecnologia de longo alcance (Lora). O módulo sugerido tem alcance operacional de 3 a 12 km e é composto por um sistema de comunicação sem fio e diversos tipos de sensores. É controlado por um aplicativo de smartphone e alimentado por uma bateria de baixa potência. No final do remetente, é feita uma conexão via Wi-Fi entre um telefone Android e um microprocessador ESP32. A eficácia do sistema foi avaliada através de três estudos de caso reais que envolveram a avaliação da temperatura e humidade do ar circundante, detecção de incêndios e controle do funcionamento de aparelhos que ligam e desligam.

Na pequena agricultura profissional, com as mudanças climáticas que afetam a colheita, Rosero-Montalvo (2023) apresenta um projeto que utiliza tecnologias em estufas como uma boa solução para diminuir os insetos e controlar o clima. Para gestão das estufas a distância com tecnologias sugere robôs, sensores, *IoT* e aprendizagem automática para tomadas de decisão do agricultor. Como solução viável para pequenas propriedades rurais, este artigo apresenta um robô autônomo que se desloca por caminhos de cultivo em estufa com rotas previamente planejadas e pode coletar dados ambientais fornecidos por uma rede de sensores sem fio, onde o agricultor não possui informações prévias sobre a cultura e um algoritmo de aprendizagem não supervisionado é implementado para agrupar os setores ideais, padrão e deficientes de uma estufa para determinar padrões de crescimento inadequados nas culturas.

Marius-Constantin (2023, p.1), propõe para “melhorar o desempenho de equipamentos antigos, integrando um servidor web na estrutura do PLC e utilizando dispositivos I/O-Link.

Esta solução visa transformar equipamentos antigos em dispositivos inteligentes capazes de se adaptarem às mudanças ambientais e de produção sem exigir uma reconfiguração completa do sistema, o que pode ser uma opção mais rentável e viável do que a substituição completa. Através da integração de recursos inteligentes, a atualização de equipamentos mais antigos para cumprir os padrões da Indústria 4.0 permite funcionalidade adaptativa sem a necessidade de reconfiguração extensa. Essa transformação facilita a troca tranquila de dados, o monitoramento em tempo real, aumenta a eficiência operacional, pra a produtividade e a flexibilidade.”

A gestão de resíduos tornou-se uma questão crítica devido ao aumento exponencial da população mundial e os governos devem encontrar formas sustentáveis de gestão utilizando tecnologia. G.Pant (2023), discute especificamente diferentes modelos de gestão de resíduos usando IA e *IoT*. Inclui um ecossistema inteligente para monitoramento em tempo real da gestão de resíduos. Algoritmos como Rede Neural Convolucional, Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptativo, tecnologias *IoT* como Identificação por Radiofrequência (RFID) e sensores foram discutidos neste estudo. O objetivo é refinar e fornecer sistemas precisos, eficientes e sustentáveis de gestão de resíduos. Isto também ajuda a proteger o ambiente e a saúde das pessoas, e consequentemente a alcançar os objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.

Liu (2023), em seu estudo apresenta aplicação de sensores, *ML* e *IoT* para monitoramento de fornos industriais. A pesquisa propõe uma nova técnica de análise da pegada de carbono em dados ambientais da Indústria 4.0 de manufatura verde usando aprendizado de máquina com Internet das coisas inteligente (*IIoT*). Aqui, os dados ambientais da indústria manufatureira verde são coletados e processados para analisar a presença de carbono pelo monitoramento do ar, formas de reduzir as emissões de carbono e o uso de energia com base em estudos de caso que fazem uso da nossa metodologia.

Únal (2023), propõe utilizar tecnologias para substituir protótipos físicos, replicando-os digitalmente, com todos os seus atributos utilizando *Big Data*, IA e *Machine Learning* para realizar testes, entender seu desempenho em tempo real, simulando diferentes cenários sendo possível aumentar a eficiência geral do equipamento, minimizar o consumo de energia, permitir manutenção preditiva, otimização de processos, monitoramento de condições e minimização de resíduos.

A monitoramento é crucial para fornecer água potável segura e gerir os recursos hídricos protegendo o ambiente circundante. Segundo Sohail (2023), esforços de pesquisa têm sido feitos para fornecer soluções de monitoramento da qualidade das águas em tempo real

utilizando as tecnologias mais recentes. O trabalho explica o monitoramento da água tradicional baseado em laboratório e métodos mais avançados de monitoramento em tempo real usando redes de sensores sem fio, internet das coisas industrial, análise de *big data* e outras.

Prashanth (2023) desenvolve um novo sistema de monitoramento e análise baseado em *IoT* para um sistema de extração de pó de polímero reforçado com Fibra em um ambiente industrial 4.0. O sistema é composto por um microcontrolador, um sensor de poeira, um sistema de recuperação de energia de gases de combustão e um sistema *IoT*. Os resultados demonstram a importância de monitorizar tanto o sistema de extração de poeiras como o sistema de recuperação de energia para otimizar o seu desempenho e minimizar o impacto das poeiras no ambiente. A capacidade de acompanhar eventos em tempo real e examinar dados permite um método de remoção de poeira que é mais produtivo e ecológico, diminuindo o impacto ambiental das operações industriais.

Gualpa (2023, p.1), cria um sistema de irrigação inteligente para parques utilizando tecnologias da Indústria 4.0. O sistema usa orquestração de rede de servidores para coordenar e sequenciar processos existentes. Ao regular o consumo de água com base nas condições do solo e climáticas, bem como nas necessidades das plantas tornando um sistema inteligente de irrigação. O monitoramento e controle em tempo real de todos os dados do sensor garantem o uso eficiente da água. A plataforma compreende um microcontrolador de baixo custo, que monitora, controla e supervisiona automaticamente ou manualmente o estado da irrigação. O microcontrolador coleta dados de umidade, parâmetros ambientais e temperatura do solo, que são armazenados em um banco de dados e exibidos em um site.“

Liaw (2023), afirma que a agricultura 4.0 utiliza tecnologias tais como Internet das Coisas (*IoT*), análise de *big data* e sensores inteligentes para coletar informações, controlar parâmetros e tomar decisões para otimização de produtividade agrícola.

Aleksieva (2023), propõe um modelo de nuvem baseado em uma rede de sensores *IoT* usando blockchains para armazenar eventos ambientais inesperados. Embora a informação recebida dos vários sensores seja heterogênea, ela é armazenada, indexada, pesquisada, os dados são visualizados e os valores limite dos vários sensores são geridos. Ao mesmo tempo, o sistema inteligente registra apenas os dados que vão além dos valores permitidos, procura parâmetros específicos e fornece acesso aos dados

Para Azlan (2023), a redução do consumo de energia na produção pode melhorar significativamente o desempenho ambiental, reduzindo a pegada de carbono para as indústrias. Um estudo se concentra no desenvolvimento de um sistema de monitoramento de energia em

tempo real para múltiplas máquinas por meio de uma plataforma de aplicativos de código aberto incluindo a integração e interligação de dispositivos de Internet das Coisas (*IoT*), plataformas de aplicações web e banco de dados registrando tensão, corrente, potência de pico, consumo de energia, custo de energia e emissões de carbono, capacitando os usuários finais a tomar decisões de acordo com os objetivos de fabricação.

Em uma caldeira foi aplicado um sistema de controle de energia e melhoria de eficiência do resultado utilizando tecnologias, Ali (2023), apresenta um estudo utilizando implementação de um ecossistema que inclui tecnologias 4.0, como inteligência artificial, Internet das Coisas e *Big Data*. O monitoramento e controle facilita a transição para uma nova perspectiva ambiental de otimização do consumo de energia e melhoria de desempenho.

Para monitorar conservação de água doce no mundo, Kopishynska (2023), propõe usar tecnologias da Indústria 4.0 e meios de ampliar a funcionalidade de mapas interativos de corpos d'água a partir da aplicação do método batimétrico (dados da topografia do fundo do corpo d'água) e da utilização da visualização 3D, da inteligência artificial e da Internet das Coisas no processamento e interpretação dos dados recebidos. Os dados batimétricos obtidos em reservatórios digitalizados permitirão realizar uma análise das características subaquáticas (profundidade, tipo de solo, nível de poluição, incluindo mecânica, densidade da vegetação, etc.), no interesse de avaliar o estado do ecossistema, volume de água, adequação para sistemas de pesca, irrigação, etc.

O controle da poluição, a eliminação da contaminação, a minimização da libertação de produtos químicos perigosos, a reciclagem e reutilização de águas residuais são os fatores-chave para melhorar a qualidade da água, o que ajuda a levar uma vida saudável. Arora (2023) apresenta algumas sugestões para trabalhos de investigação futuros de tecnologias da I4.0 na gestão da qualidade da água, como a proteção ambiental, melhoria da saúde, e o desenvolvimento da transformação digital que aumenta a eficiência e a precisão no monitoramento em tempo real.

Na Agricultura, indústria agroalimentar, para reduzir resíduos e aumentar a sustentabilidade, Stefanuto (2023) afirma que as tecnologias digitais, por exemplo, a Internet das Coisas (*IoT*) e a Inteligência Artificial (IA), podem ser utilizadas para revolucionar a agricultura ao permitir um monitoramento mais eficiente e inteligente. O monitoramento de demanda reduz o desperdício e o controle de parâmetros ambientais, operacionais e energéticos, como temperatura, umidade do ar, umidade do solo, precipitação, consumo de água e eletricidade para irrigação melhorando a produtividade.

A qualidade do ar tornou-se um grande problema em escala global. Soni (2023) apresenta um estudo de caso sobre a fusão de sensores meteorológicos com dispositivos de sensoriamento remoto. Este estudo de caso demonstra a relação entre sensores meteorológicos, como temperatura, vento e umidade relativa, e a camada limite atmosférica, bem como sua importância no monitoramento regional da qualidade do ar. O estudo de caso também destaca a necessidade de tecnologias avançadas, como *IoT* e Inteligência Artificial (IA) serem integradas no campo do monitoramento ambiental.

Na agricultura 4.0, uma empresa utiliza de *IoT* para monitorar em tempo real dados do seu processo. O estudo de Spagnuolo (2023), apresenta um sistema de monitoramento inteligente e multiparâmetro customizado para obter medições de temperatura e umidade em tempo real dentro dos fornos de secagem industriais da empresa e mostrar como é possível extrair informação de dados operacionais e convertê-la também em um suporte à decisão para melhor compreender a eficácia do processo produtivo.

Segundo Venanzi (2023), a silvicultura de precisão é uma técnica útil para ajudar as partes interessadas florestais no manejo sustentável adequado. Sensores e tecnologias da I4.0 modernas, com especial referência à sustentabilidade das operações florestais, podem ser aplicadas em vários níveis, incluindo o monitoramento das atividades florestais nos três pilares (economia, meio ambiente e sociedade). O monitoramento remoto pode ser eficaz ao usar dados por máquinas florestais modernas. A mesma informação pode ser efetivamente utilizada para criar mapas de trafegabilidade do solo com uso de (Sistemas Globais de Navegação por Satélite – Radiofrequência) e para avaliar os padrões de pistas de arraste ou estradas construídas como resultado da intervenção florestal. Finalmente, em termos da componente social da sustentabilidade, é fortemente aconselhável a utilização de tecnologias de localização, baseadas, por exemplo, para monitorizar a segurança dos trabalhadores florestais enquanto operam.

Guzmán (2023), afirma que a implementação de tecnologias de sensores é uma alternativa atraente para a indústria mineradora no atual contexto de digitalização com sensores de baixo custo por monitoramento em tempo real, uso de sistemas de redes sem fio, inteligência artificial, aprendizado de máquina, gêmeos digitais e *IOT*, entre outras tecnologias da era da Indústria 4.0 para a monitorização de aspetos relacionados com a sustentabilidade e segurança nas atividades nas minas em todo o mundo, para mitigar os impactos socioambientais, promover o uso eficiente da água, reduzir a pegada de carbono, utilizar energias renováveis, reduzir os resíduos mineiros e minimizar os riscos de acidentes fatais.

Segundo Tahmasebina (2023), a tecnologia digital, que está no centro da Indústria 4.0, ganhou ampla adoção em vários campos, incluindo a análise energética de edifícios. Com a capacidade de monitorar, otimizar e prever o consumo de energia em tempo real.

Segundo Fontoura (2023), as tecnologias da Indústria 4.0 promovem as melhores práticas de eficiência energética em processos industriais, propõe um novo modelo de gestão *Lean* denominado mapeamento de fluxo de energia em tempo real. Este modelo inovador fornece capacidades para um sistema de gestão visual, digital e sustentável de todo o comportamento energético em máquinas e equipamentos utilizando métricas e regras totalmente parametrizáveis para tomadas de ações de sustentabilidade industrial.

Na agricultura, Biazi (2023), afirma que a aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 para recolher e armazenar dados em tempo real através de sensores interligados e outros equipamentos automatizados permite aumentar a precisão da operação da exploração agrícola e apoiar decisões mais rápidas baseadas em evidências. O estudo apresenta as tecnologias específicas, como sistemas de câmeras para monitoramento animal e ambiental, redes de sensores e *IoT* para coletar, transmitir e armazenar dados, dispositivos automatizados para apoiar algumas atividades e tarefas de monitoramento, ferramentas para apoiar a interpretação de dados e a tomada de decisões com tecnologias modernas de detecção para parâmetros difíceis de monitorar.

Segundo Hachisuca (2023), na agricultura 4.0 utiliza técnicas de Internet das Coisas (*IoT*), sensores instalados no campo, rede de sensores interligados, drones para monitoramento da cultura, câmeras multiespectrais, armazenamento e processamento de dados em *Cloud Computing* e técnicas de *Big Data* para processar os grandes volumes de dados gerados. Uma das opções práticas para implementação da agricultura de precisão é uma rede de sensores para monitoramento climático de zonas de manejo (microclimas), permitindo a identificação dos fatores climáticos que influenciam a produtividade em cada uma de suas etapas.

O monitoramento da qualidade da água em laboratório tem alta complexidade, alto custo e um tempo de resposta longo, assim Thakur (2024) pesquisa possibilidades para a sustentabilidade dos nossos aquíferos, e afirma que é “essencial desenvolver e implementar sistemas técnicos portáteis e de fácil utilização para monitorizar as fontes de água em tempo real ou no local. A revisão enfatiza possíveis abordagens, incluindo óptica (absorbância, fluorescência, colorimétrica, fluorescência) de raios X, quimio (luminescência, eletroquímica e cronoamperometria), elétrica, biológica e de detecção de superfície, como candidatos ao desenvolvimento de tais plataformas com possível integração de *IoT* para aplicação ambiental.

Em relação a emissão de gás estufa, é muito importante controlar e tornar a produção mais limpa e eficiente em recursos. Assayed (2024) realiza um exemplo prático em Indústria de alimentos entre o crescimento económico e a degradação ambiental, e assim, apoia a transição para emissões líquidas zero. Em seu estudo economizou energia, água, matéria prima e redução de CO₂ com a integração das ferramentas da Indústria 4.0 na produção mais limpa e económica de recursos demonstrando ser muito eficiente, uma vez que as indústrias se tornaram capazes de monitorar e validar todos os dados coletados em tempo real, otimizando a utilização dos recursos naturais. Medidas de economia e avaliação de desempenho foram vinculadas a sensores *IoT* e *blockchain* em uma indústria alimentícia na Jordânia com informações precisas e muito úteis para avaliar o fluxo de entrada-saída dentro dos limites da indústria ajudando no monitoramento preciso da pegada de carbono.

Segundo Gupta (2024), as tecnologias da I4.0 de maquinação sustentáveis e energeticamente eficientes podem reduzir o consumo de energia e os efeitos ambientais negativos. O estudo apresenta o monitoramento e medição em tempo real das características energéticas durante a usinagem de ligas de titânio sob condições secas, com lubrificação por quantidade mínima.

Aretoulaki (2024), afirma que a taxa cada vez maior de catástrofes naturais imprevisíveis que põem em perigo o ambiente e as vidas humanas, além da obsolescência, inadequação e ineficiência dos atuais métodos de gestão de crises e de evacuação. Em seu estudo abordou a necessidade de inovação à prevenção de incêndios florestais. Este artigo apresenta uma metodologia integrada para o desenvolvimento de um sistema de alerta precoce e gestão de incêndios florestais, com foco na rápida detecção da fonte inicial do incêndio, na estimativa da propagação do fogo, bem como na facilitação de sua imediata contenção, extinção antes que ele se espalhe, que possa ser controlado e consequentemente a evacuação efetiva de áreas ameaçadas. O sistema proposto utiliza tecnologias emergentes da Indústria 4.0, ou seja, Veículos Aéreos Não Tripulados, Internet das Coisas (*IoT*) e *Big Data Analytics* para coleta, processamento e análise de dados, bem como tecnologias de redes sociais capazes de facilitar a comunicação bidirecional entre os residentes, visitantes, autoridades locais de uma área de floresta.

Segundo Huang (2024), com as tecnologias da Indústria 4.0, mas específica *IoT*, pode ser medido e avaliado em tempo real as emissões e as consequências que um produto ao longo do ciclo pode gerar ao meio ambiente com as emissões de carbono para possibilidades de melhoria nos desenvolvimentos dos produtos.

Segundo Terrés-Puertas (2024), o lixo eletrônico (e-lixo) contém elementos tóxicos que causam importante impacto ao meio ambiente e à saúde humana. Possui presença de metais valiosos, como o cobre ou o ouro, entre outros e torna a reciclagem uma necessidade para a obtenção de uma fonte alternativa de matérias-primas. Os métodos convencionais de recuperação de metais são ambientalmente prejudiciais, levando à exploração de alternativas mais ecológicas, como a biolixiviação, uma recuperação mais sustentável. Um sistema *IoT* e sensores industriais de código aberto foi projetado para aprimorar e regular a biolixiviação, implementando o monitoramento e controle em tempo real na infraestrutura da planta. O aplicativo atende a necessidades específicas, como leitura remota de sensores, controle de atuadores e alertas de biolixiviação em tempo real, garantindo acesso seguro e gerenciamento proativo de eventos e alertas da planta aos usuários para prevenir falhas irreversíveis da planta por meio de um sistema de alarme avançado.

Para desenvolver um processo de fabricação sustentável em fábricas industriais, uma vez que a indústria deseja permanecer competitiva enquanto é desafiada a adotar práticas ecologicamente corretas, Sorostinean (2024), propõe um software baseado em *Machine Learning* para tratar das questões ambientais, visando facilitar o monitoramento e análise de máquinas industriais, mais exatamente de máquinas CNC para marcenaria. O foco está em dois aspectos que determinam o impacto ambiental: o consumo de energia e as emissões tóxicas, que são utilizadas para determinar os modos de operação das máquinas para detectar potenciais anomalias de funcionamento.

Para caracterização das fontes de impacto antropogênico (causado pela ação humana), tais como dinâmica da qualidade dos ambientes naturais durante a dispersão e acumulação de poluentes para a implementação de relações de mercado no domínio das quotas de carbono, dando a possibilidade de redistribuir a área de responsabilidade das empresas de produção, Goncharov (2024), desenvolve um sistema automatizado de gestão de segurança ambiental, incluindo um complexo de hardware e software que baseado na tecnologia da Internet das Coisas permite a coleta e integração de informações ambientais heterogêneas recebidas de diversos sensores com seu posterior armazenamento e processamento em um sistema em nuvem. O sistema proposto, baseado em tecnologia de registro distribuído, garante abertura e acessibilidade dos dados ambientais.

Na relação entre I4.0 e a sustentabilidade, o pesquisador Bhambri (2024), investiga o potencial transformador das tecnologias avançadas, com foco específico na inteligência artificial, no monitoramento, mitigação e otimização das consequências ambientais dos

processos industriais modernos. Os dados são usados para tomar decisões informadas que minimizem o consumo de recursos, reduzam as emissões e reduzam a geração de resíduos, ao mesmo tempo que otimizam a eficiência da produção dentro da estrutura da Indústria 4.0.

Na produção agrícola, Metkewar (2024), afirma que o monitoramento em tempo real, a colheita, o processamento e a comercialização foram aprimorados pela inteligência artificial, para detecção de ervas daninhas, detecção de rendimento, qualidade da colheita, monitoramento de culturas e solo, detecção de doenças de insetos e plantas, pulverização inteligente, remoção automática de ervas daninhas e levantamento aéreo são vários sistemas informáticos de alta tecnologia. O emprego de robótica, drones, sensores, IA e imagens computacionais combinados com ferramentas analíticas são para obter *insights* e monitorar as fazendas na agricultura.

Para abordar o aspecto de emissão de gás efeito estufa, Duracio (2024), apresenta um estudo para uma análise baseada em metrologia que são investigados com um duplo objetivo: delinear uma metodologia para avaliar algoritmos de IA considerando também as consequentes emissões de gases com efeito de estufa e compreender melhor como continuar a melhorar o seu desempenho de classificação de uma forma não prejudicial para o ambiente.

Para controle da formiga devastadora vermelha na agricultura, Su (2024) desenvolveu um sistema de vigilância inovador que utiliza inteligência artificial e cães robóticos para automatizar a detecção e geolocalização de ninhos das formigas, melhorando assim as estratégias de monitoramento e controle. O sistema de vigilância projetado, por meio da integração da plataforma robótica de nome *CyberDog* (robô), detecta por imagem em tempo real, demonstrando taxas de precisão de detecção de ninhos >90%, precisão final de 0,95 de confiabilidade, detecção três vezes mais que os inspetores humanos, mas a operação é mais lenta. A implementação deste sistema poderá abrir caminho para aplicações mais amplas na monitorização ambiental e no controle de pragas, contribuindo em última análise para a preservação da biodiversidade e a estabilidade económica.

A Indústria 4.0 oferece uma solução inteligente e eficiente para monitorização ambiental e gestão sustentável de recursos. Cardia (2024), desenvolve em monitoramento uma solução inovadora para avaliação da qualidade de águas residuais ao integrar a espectroscopia Ultravioleta-Visível com Machine Learning (ML), determina com precisão os principais indicadores, como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais Suspensos (STS), cloretos e condutividade. O estudo demonstra a eficácia dos modelos de ML na previsão precisa da qualidade da água a partir de dados espectrais, ressaltando seu potencial para monitoramento e análise em tempo real em ambientes industriais.

O monitoramento da qualidade do ar atmosférico é importante no desenvolvimento sustentável para reduzir as emissões e fazer ajustes a tempo. Abzhanova (2024) propõe a integração conceitual da tecnologia *Blockchain* e *IoT* em um sistema inteligente com um banco de dados das principais fontes estacionárias de poluentes, com regulação de cotas de emissão com um dos componentes-chave do sistema inteligente.

Kumar (2024), afirma que a implantação de sensores inteligentes para monitoramento ambiental na Indústria 4.0 é uma área de investigação em rápido crescimento com potencial para revolucionar os sistemas industriais. Fornece informações das técnicas mais modernas para a implantação de sensores inteligentes para monitoramento ambiental em ambientes da Indústria 4.0 e seu potencial para melhorar a saúde e a segurança dos trabalhadores e a sustentabilidade dos sistemas industriais. Explora monitorar temperatura, umidade, qualidade do ar, poluição sonora e outros fatores ambientais que impactam a saúde e a segurança dos trabalhadores em ambientes industriais para gerenciamento de dados, segurança dos dados e IA para analisar as grandes quantidades de dados gerados por redes de sensores inteligentes para monitoramento ambiental em ambientes da Indústria 4.0.

Segundo Gu (2024), os resultados indicam que a aplicação de materiais inteligentes e sensores ambientais térmicos pode ajudar a reduzir o consumo de energia na produção, melhorar a eficiência operacional e otimizar significativamente o desempenho financeiro das empresas.

Segundo Khadake (2024), a agricultura 4.0 é a mais recente revolução agrícola que utiliza tecnologia digital para tornar a indústria mais inteligente, eficiente e ambientalmente consciente. Os avanços nas tecnologias agrícolas visam aumentar a sustentabilidade e otimizar os métodos agrícolas para aumentar a produtividade. Todas as formas de digitalização e automação, como dados em massa, o sistema de monitoramento usando indústria 4.0, robótica, realidade virtual aumentada e agricultura inteligente estão incluídas

Segundo Gafar (2024), o monitoramento de energia é muito importante para economia e melhoria dos resultados de sustentabilidade. Em seu artigo, apresenta o aplicativo e o painel de sugestões para aumentar a eficiência por meio da análise de imagens e modernização de aspectos como ventilação, controle de temperatura e métodos de gamificação que acionam alertas em tempo real e monitoramento inteligente de todas as máquinas e aparelhos. Posteriormente, isso notifica os gerentes das instalações e pode levar a economias de custos significativas gerando facilidades a fabricação inteligente e sustentável.

Para Malik (2024), o mundo está atualmente passando por uma enorme transição em direção à digitalização e à sustentabilidade. A sustentabilidade centra-se na gestão responsável dos recursos e na preservação ambiental, enquanto a digitalização implica a conversão de muitos processos e sistemas para formas digitais conectadas. A gestão energética, que visa oferecer soluções energéticas limpas e acessíveis, minimizando simultaneamente os resíduos e os danos ambientais, é um dos setores importantes que merece atenção significativa neste contexto. Os medidores de energia “inteligentes”, que podem enviar dados de consumo periodicamente ou em tempo real com a Internet das Coisas (*IoT*), a rede de sensores e a Inteligência Artificial (IA) e a automação são tecnologias-chave para promover esta transformação. Estas tecnologias são essenciais para melhorar a produtividade, a sustentabilidade e a eficiência em todos os setores. Os dispositivos habilitados para *IoT* são cruciais para o monitoramento e gerenciamento em tempo real do uso de energia no campo da gestão de energia.

A *IoT* melhora a agricultura inteligente, segundo Kaur (2024), o monitoramento ambiental de culturas é criado para satisfazer as demandas da sociedade contemporânea para o monitoramento ambiental de culturas agrícolas. O sistema coleta, processa e encaminha dados para o módulo de rede conectando os sensores de coleta de dados apropriados para sistema de controle da água em irrigação.

Segundo Costa (2024), o projeto desenvolvido é uma ferramenta poderosa baseada em Java projetada para análise abrangente de detecção visual em diferentes cenários. Ele aproveita uma modelagem 2D uniforme de visão superior de câmeras e alvos, bem como equações de geometria analítica para calcular o campo de visão sendo um recurso valioso para o planejamento de cobertura visual em diversas áreas de pesquisa, como indústria 4.0, cidades inteligentes e monitoramento ambiental.

Para monitoramento de água limpa e saudável no meio ambiente, Lal (2024), apresenta um sistema que consiste em sensores de baixo custo utilizados para medir cinco parâmetros básicos de qualidade da água que são: turbidez, total de sólidos dissolvidos, temperatura, pH e oxigênio dissolvido. O sistema incorpora eletrônica e tecnologia *IoT* que são alimentadas por uma bateria de chumbo-ácido carregada com energia solar. Os dados coletados dos sensores foram armazenados localmente em um cartão micro-SD com atualizações ao vivo que podiam ser visualizadas em um dispositivo móvel quando próximo ao sistema. O sistema implantado era robusto e autônomo, monitorando efetivamente a qualidade da água em tempo real, com o

objetivo de adicionar mais sensores e empregar o paradigma da Indústria 4.0 para prever variações na qualidade da água.

Aragonés (2024), afirma em seu estudo que o controle e os dados em tempo real de consumo de energia em auto fornos é muito importante para o monitoramento industrial e para o meio ambiente, minimizando o impacto de gases efeitos estufa na atmosfera pelo uso de calor e dispensa de gás na atmosfera reaproveitando em forma de calor para não jogar calor residual na atmosfera.

Segundo Hu (2024), a aplicação da mineração de dados e da tecnologia Internet das Coisas na monitorização de redes inteligentes e na gestão de energia, com especial enfoque na gestão de energia térmica tem objetivo de melhorar a eficiência da utilização de energia e alcançar uma regulação dinâmica promovendo o desenvolvimento de empresas na direção da proteção ambiental de baixo carbono.

Considerando as aplicações das tecnologias da I4.0 em MA observa que a maior parte dos artigos analisados datam de 2019 em diante e apontam uma tendência crescente de pesquisas que destacam a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em monitoramento ambiental, apresentando tanto desafios quanto oportunidades para a promoção da sustentabilidade.

As pesquisas indicam que o uso de tecnologias da I4.0 no monitoramento ambiental é uma realidade que conta com o suporte da tecnologia da informação. Há, também, uma tendência de expansão dessas tecnologias para viabilizar a sustentabilidade no monitoramento ambiental, na cadeia de suprimentos, na saúde dos trabalhadores e da sociedade.

As inovações integradas às tecnologias da I4.0 para monitoramento ambiental em tempo real permitem maior controle, decisões baseadas em dados e ações preventivas. Essa abordagem tende a ser cada vez mais aplicada, especialmente com a ampliação da cobertura de internet, incluindo internet via satélite, a custos mais acessíveis.

Entretanto, a transição digital de fábricas para o monitoramento ambiental utilizando tecnologias da I4.0 ainda não é amplamente explorada no contexto da sustentabilidade. Isso ocorre, em parte, porque nem sempre esses projetos apresentam resultados financeiros imediatos para as organizações.

De acordo com Valentini (2019), a IoT expandiu-se rapidamente e representa uma oportunidade única para aprimorar recursos de monitoramento ambiental a custos reduzidos. E completando, Library (2019) observa que redes de sensores foram amplamente aplicadas em diversas áreas de monitoramento ambiental na última década, utilizando *IoT* e *Cyber-Physical*

System (CPS). Essas tecnologias são inovadoras, mas enfrentam desafios como o consumo energético, custos, e limitações de largura de banda para transferência de dados on-line e remota.

Áreas como gestão e monitoramento ambiental, agronegócios, recursos hídricos, qualidade do ar e energia lideram a adoção de *IoT*, redes de sensores, *big data* e inteligência artificial (IA). Recentemente, a IA e o blockchain começaram a ganhar destaque nas pesquisas, complementando as tecnologias da I4.0 ao otimizar informações e controles em tempo real.

Os artigos analisados demonstram um aumento no uso de tecnologias da I4.0 no controle de recursos empregados em processos industriais, promovendo economia e, indiretamente, contribuindo para o pilar ambiental. O monitoramento de recursos energéticos, como eletricidade e combustíveis, impacta diretamente os custos industriais e o meio ambiente.

As revisões bibliográficas indicam amplas oportunidades para resolver problemas com a adoção de tecnologias da I4.0 no monitoramento ambiental, além de possibilidades para o desenvolvimento de sistemas mais acessíveis e eficientes. Esses avanços podem incentivar inovações que permitam o monitoramento ambiental em tempo real com soluções acessíveis.

A pesquisa conceitual das aplicações acadêmicas e empíricas oferecem uma base para explorar novas abordagens e superar barreiras, criando tecnologias inovadoras que automatizem o monitoramento ambiental e mitiguem impactos em tempo real, utilizando as tecnologias da I4.0 para controle on-line de aspectos e impactos ambientais.

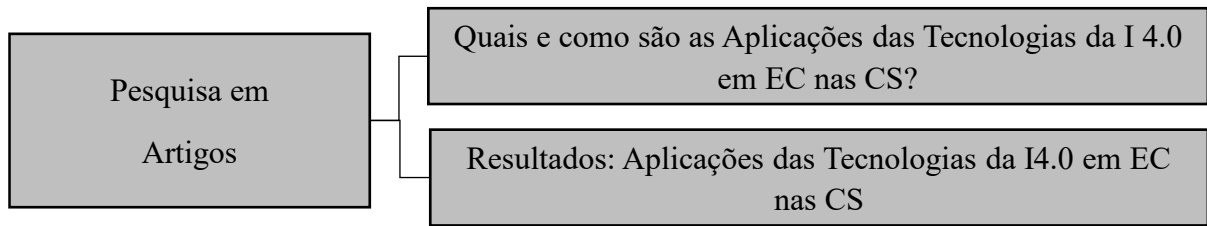
2.9 TECNOLOGIAS DA I4.0 EM ECONOMIA CIRCULAR NAS CS

Para conceituar e apresentar as aplicações das tecnologias da I4.0 em Economia Circular (EC) nas Cadeias de Suprimentos (CS), foi realizada uma pesquisa de levantamento bibliográfico em artigos de base científica.

A escolha por uma pesquisa somente em artigos científicos deve-se ao fato de ser uma abordagem recente no que se refere às propostas de aplicação prática das tecnologias da I4.0 em EC nas CS. Além disso, essa pesquisa permite uma abrangência mundial, reunindo relatos de aplicações em estudos acadêmicos e empíricos.

Foram realizadas análises de artigos publicados em um determinado período, considerando as tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em Economia Circular (EC) nas Cadeias de Suprimentos (CS). A Figura 11 estrutura a questão da pesquisa:

Figura 11 - Estrutura Pesquisa Aplicada I4.0 em EC nas CS



Fonte: Elaborada pelo Autor (2023)

Q2: Quais e como são aplicadas as tecnologias da I4.0 em EC nas CS?

A pesquisa apresentou em seus resultados resposta à questão de quais e como são aplicadas as tecnologias da I4.0 em EC nas CS.

A pesquisa aplicada foi realizada em artigos científicos relacionados ao tema do projeto, delimitados no período de 2010 até 2024, na base única Scopus, porque muitos artigos são duplicados e com diferenças irrelevantes para a pesquisa aplicada como base conceitual da proposta principal da tese para o modelo proposto.

Utilizaram-se as palavras-chave separadas *Industry 4.0 and Circular Economy and Supply Chain* para a pesquisa, buscando em título, resumo e palavras-chave para direcionar análises de I4.0 em EC nas CS.

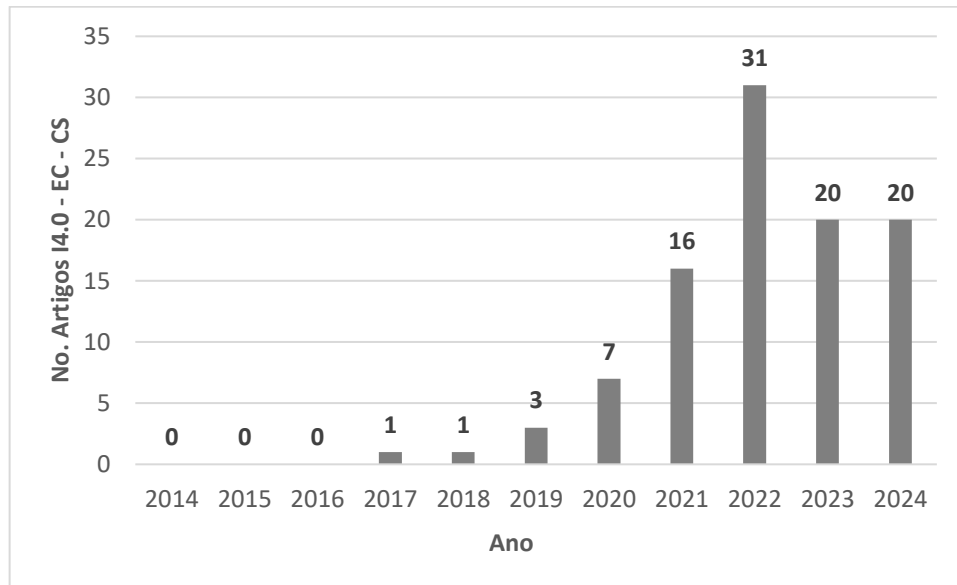
Após o levantamento dos artigos, realizou-se a leitura dos resumos para seleção dos que apresentam uma relação do uso das tecnologias da I4.0 aplicadas com base nos pilares da EC na Cadeia de Suprimentos. Esses artigos foram citados, comentados no texto e referenciados na bibliografia como base da proposta de modelo da tese.

Para o critério de inclusão dos artigos, considerou-se a tendência e o uso de tecnologia da I4.0 aplicadas com base nos pilares da EC na Cadeia de Suprimentos, com leitura dos resumos, importância das citações, revisões sistemáticas, frameworks com estudos de casos, aplicações empíricas e conteúdo aderente ao tema em revistas das áreas de Ambiental, Sustentabilidade, Software, Computação e Produção Sustentável.

Foram descartados artigos que não apresentavam sugestões de aplicações inovadoras de tecnologias da I4.0 com base nos pilares da EC na Cadeia de Suprimentos para a sustentabilidade, que apresentavam apenas conceitos e definições de I4.0 ou EC ou Cadeia de Suprimentos e artigos que tinham apenas revisões de conceitos teóricos.

Foram incluídos nas referências para pesquisa aplicada 99 artigos publicados de 2010 até 2024 conforme o Gráfico 4:

Gráfico 4 – Número de Artigos I4.0 – CS - EC / Ano

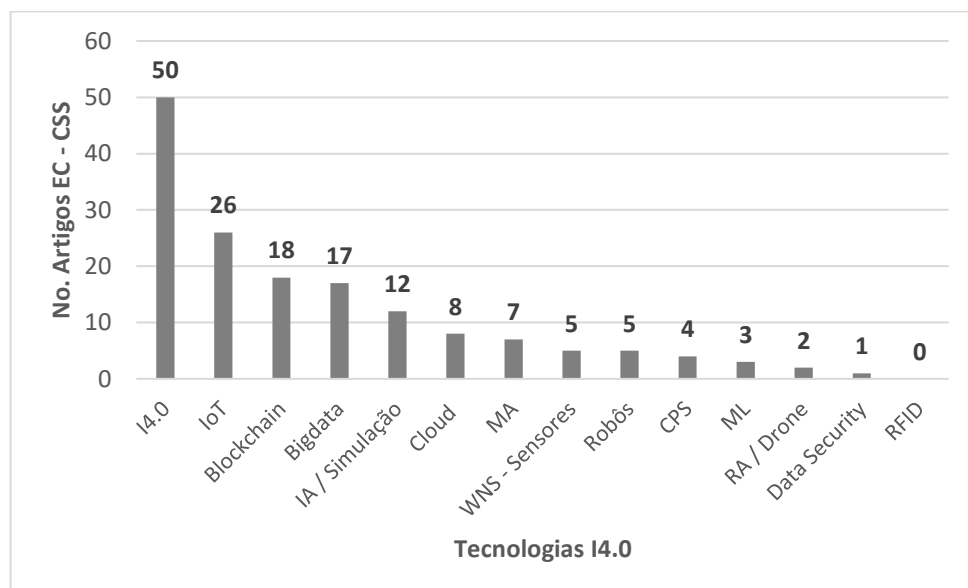


Fonte: Autor (2025)

Observou-se que os artigos publicados iniciam somente em 2017, apresentando uma tendência crescente de publicações sobre o uso das tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) aplicadas com base nos pilares da Economia Circular (EC) nas Cadeias de Suprimentos (CS). A maioria das publicações (95 de 99, ou 95,9%) são a partir do ano de 2020, com poucos casos empíricos aplicados da I4.0 com base na EC na cadeia de suprimentos.

Dos 99 artigos selecionados para a pesquisa aplicada, o resultado demonstrou no Gráfico 5 quais são as tecnologias da I4.0 que são aplicadas com base nos pilares da EC nas cadeias de suprimentos.

Gráfico 5 – Número de Artigos de EC / Tecnologias da I4.0

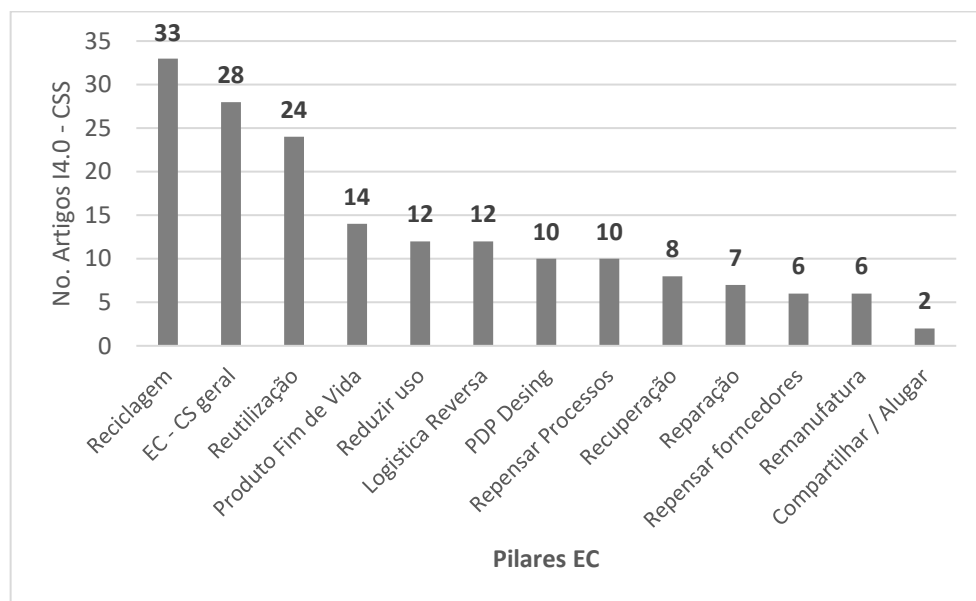


Fonte: Autor (2025)

Observou-se que a maioria dos artigos mencionam a Indústria 4.0 (I4.0) sem especificar a tecnologia exata nos pilares da Economia Circular (EC) na Cadeia de Suprimentos (CS). No entanto, alguns artigos destacam tecnologias específicas como *IoT*, *Blockchain*, *Big Data*, Inteligência Artificial e Simulação, *Cloud Computing*, Manufatura Aditiva, Sensores de Redes de Área Sem Fio (*WNS*), Robôs, Sistemas Ciberfísicos (*CPS*), Machine Learning (*ML*), Realidade Aumentada e Drones, e Segurança de Dados.

O Gráfico 6 demonstra o número de artigos por pilares da EC com uso de tecnologias da I4.0 na CS.

Gráfico 6 - Número de Artigos da I4.0 nos Pilares da EC



Fonte: Autor (2025)

Observou-se que nos artigos do levantamento bibliográfico, no framework de estudos de caso e nas aplicações empíricas, a reciclagem é a maior incidência de artigos publicados no conceito de EC. Em seguida, os artigos apresentam a EC abrangendo todos os pilares, citam depois a reutilização de produtos e materiais, as tratativas de produto fim de vida, a redução do uso de recursos e materiais, operações de logística reversa, o desenvolvimento de produtos com conceitos de EC, o repensar processos com base em EC, a recuperação e reparação de produtos, o repensar em novos fornecedores, a remanufatura, o compartilhamento e a locação de equipamentos subutilizados que precisam quebrar barreiras de posse e valor da posse.

O Gráfico 7 apresenta o número de artigos que aplicam EC em segmento não definido e em segmentos específicos.

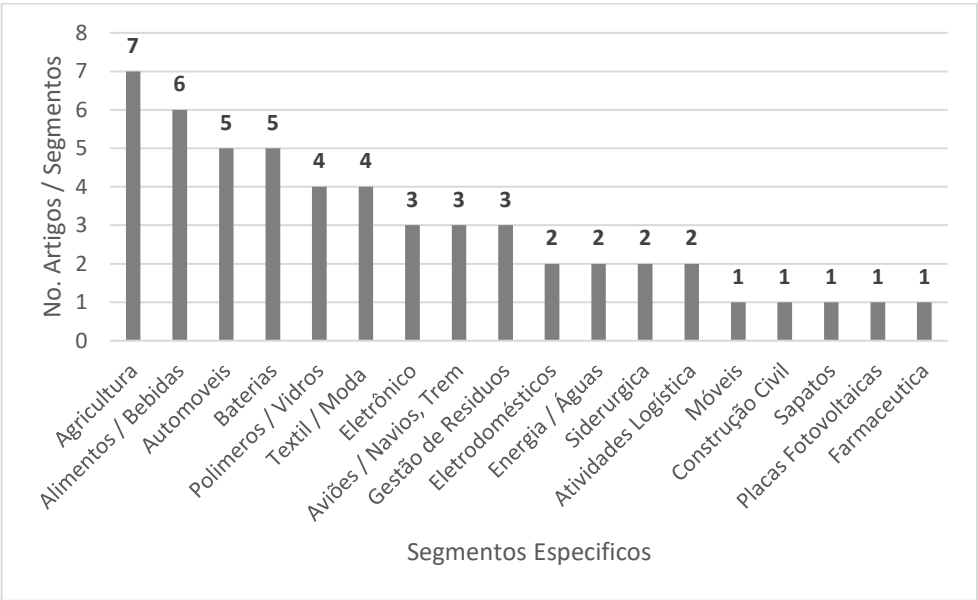
Gráfico 7 - % de artigos de EC / Segmentos de Produtos



Fonte: Autor (2025)

Na sequência, o Gráfico 8 apresenta a quantidade de artigos por segmentos específicos de aplicação dos pilares da EC.

Gráfico 8 - No. de Artigos de Aplicação de Pilares de EC / Segmento Específico



Fonte: Autor (2025)

Os principais segmentos específicos que aplicam as tecnologias da I4.0 nos pilares da EC nas CS incluem agricultura, alimentos e bebidas, automotivo, baterias, polímeros e vidros, têxtil, entre outros. O objetivo é a melhoria de modelos segmentados da sustentabilidade.

As aplicações dessas tecnologias em pilares da Economia Circular (EC) nas Cadeias de Suprimentos (CS) são citadas, descritas e referenciadas.

Para gerenciar produto fim de vida de automóveis, aviões e navios Jensen (2017), afirma que pode se utilizar tecnologias da I4.0 para se tornar um fabricante sustentável utilizando um gerenciamento de dados, a *IoT* e os sistemas de serviços aos produtos fabricados.

Tseng (2018), afirma que o segmento da comunidade científica que representa a conservação de recursos e reciclagem devem promover as inovações da I4.0 utilizando *big data* e *IoT* em pesquisas específicas para análise da confiança mútua, cultura da empresa, consumo sustentável, comportamento gerencial etc. na cadeia de suprimentos para a sustentabilidade.

Para Garrido-Hidalgo (2019), afirma e propõe uma solução *end-to-end* para *Reverse Supply Chain Management* baseada na cooperação entre diferentes padrões de comunicação *IoT*, permitindo o monitoramento de inventário baseado em nuvem de por meio de sensores embarcados.

Na cadeia de suprimentos agroalimentar, Belaud (2019), afirma que a big data pode ser utilizada no gerenciamento da sustentabilidade para valorização de subprodutos para otimizar processos em escolhas de biomassa e descarte de resíduos, que permite a análise do sistema de valorização e forneçam dados que são inseridos de pesquisas para tomadas de decisão.

Em um estudo de sucata e lixo eletrônico, Matos Nascimento (2019) explora as tecnologias da I4.0 e a integração com economia circular que reutilize e recicle materiais desperdiçados recomendando utilizar tecnologias da web, logística reversa e manufatura aditiva para apoiar as práticas de reinserir matérias na manufatura, reduzir o consumo de recursos, reduzir os impactos negativos, evitar materiais perigosos nos aterros e desenvolve redes locais de negócios de reciclagem gerando empregos melhorando o social e o econômico.

Para Chiappetta Jabbour (2020), afirma que o desenvolvimento da capacidade de análise de *big data* deve se tornar uma prioridade de negócios para construir cadeias de valor sustentáveis e competitivas de maneira eficaz; *big data* tem benefícios para cada uma das dimensões do *triple-bottom-line* (Econômico, Ambiental e Social) nas cadeias de suprimentos; a implementação de *big data* para sustentabilidade nas cadeias de suprimentos apresenta alguns desafios para as empresas; o desenvolvimento de capacidades organizacionais complementares é necessário para superar desafios e facilitar os benefícios da tecnologia de *big data* para o gerenciamento sustentável da cadeia de suprimentos.

No segmento de eletrodomésticos, Bressanelli (2020), esclarece em seu estudo que a economia circular está em estágio inicial nas empresas de manufatura, que a linha branca tem

grande potencial para a economia circular e os estudos de caso demonstrou que para a estratégia radical a serviços e gerenciamento da cadeia de suprimentos com uso *de IoT, big data e cloud* são facilitadores e tem ampla alavanca para reutilização e remanufatura na EC, e estratégia incremental tem pouca atenção a práticas da EC em design de produto, redução de consumo e reciclagem adotadas pelos fabricantes.

Sun (2020) afirma que a impressora 3D da manufatura aditiva é circular fechada porque o resíduo e os materiais podem ser reciclados e reutilizados, mas para alguns produtos os impressores não utilizam o material reciclado porque eles perdem propriedades, algo comum também em outros processos principalmente para polímeros.

Segundo Kintscher (2020), afirma que a digitalização da I4.0 é a chave da reciclagem para a EC no futuro, e apresenta um modelo de rastreamento para baterias de carros elétricos que passa por uma análise funcional para tomada de decisão e transmissão de dados de substituição ou não da bateria, e desmontada se substituída por um robô para ser totalmente reciclada suas partes e outras para destinação correta contribuindo para um circuito fechado de baterias na EC com uso de I4.0.

Segundo Blomeke (2020), a reciclagem 4.0 é a digitalização dos processos com foco na fase fim de vida do produto e a tecnologia da I4.0 tem a função de transmitir e usar informação ao longo de toda cadeia de suprimentos de baterias elétricas de veículos para uma economia circular avançada neste segmento.

Cwiklicki (2020), afirma que as tecnologias da I4.0 direcionam para uma integração e sinergia com EC nos pilares de reciclagem e reutilização aplicada na produção inteligente da cadeia de suprimentos sustentável e as tecnologias mais promissoras da I4.0 aplicadas são *IOT e Big Data*.

Segundo Bagalagel (2020), que estudou um modelo matemático de simulação de decisão de otimização ambiental, social e lucro para a recuperação e remanufatura de máquinas de lavar rastreadas com utilização de tecnologias da I4.0 para a EC para favorecer que os produtos pudessem se tornar economicamente mais competitivo economizar em materiais e energia, mas contrariamente não teve resultados promissores nos casos simulados nesse segmento de produto mas podem ter outras simulações levando em consideração outros fatores e segmentos e o sistema de informação pode otimizar envio de mix de peças para reparos.

Na indústria de móveis, Wisniewska-Salek (2021), afirma gerenciar uma cadeia de suprimentos sustentável eficiente depende do uso das tecnologias da I4.0 e o modelo de

gerenciamento do abastecimento da indústria deve centrar na vertente ambiental das matérias primas e no consumo ecológico para gestão sustentável.

Na cadeia de suprimentos de alimentos, Ada (2021) demonstra 7 barreiras para aplicar os pilares de economia circular para a sustentabilidade e cita que tecnologias da I4.0 podem facilitar a quebra das barreiras. As barreiras são culturais, negócios e finanças, gerência, conhecimento e habilidades, tecnologias, gestão da cadeia de suprimentos que pode ser especificamente utilizada *Machine learning* e regulamentação e governo que pode ser especificamente utilizado *Big Data e Blockchain*.

Segundo Khan (2021), em sua pesquisa de revisão sistemática, afirma que a I4.0 tem implicações nos modelos de negócios sustentáveis e economia circular, que a maioria das pesquisas são conceituais e a *IoT* é a tecnologia mais aplicada para alcançar os pilares da sustentabilidade e que as aplicações são em cadeias produtivas sustentáveis, cidades inteligentes sustentáveis e fábricas inteligentes.

Blockchain são livros contábeis ou banco de dados descentralizados armazenados, abertos, atualizados de maneira segura, invioláveis e irreversíveis. Segundo Upadhyay (2021), afirma que o blockchain pode contribuir muito com a economia circular ajudando a reduzir custos de transações e melhorar a comunicação na cadeia de suprimentos, garantindo melhorar a legalidade de dados e a sustentabilidade.

Esmaeilian (2020) em seu estudo demonstra a integração de *blockchain* e da I4.0 para o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos mais sustentável com base em tópicos de gestão de energia com uso de IOT em fábricas, logística inteligente e negócios inteligentes desdobrando o *blockchain* para a sustentabilidade em mecanismos de *tokenização* para motivar o comportamento verde do consumidor, visibilidade do ciclo de vida do produto, eficiência dos sistemas e redução de custos e monitoramento da sustentabilidade nas cadeias de suprimentos.

No setor agrícola, Mahroof (2021) afirma que deve ser aplicado os pilares da EC, desenvolvido tecnologias da I4.0, realizar testes com Drones - IA para ter uma cadeia de suprimentos mais limpa, inclusive no uso e aplicação de pesticidas com base na economia circular, para reduzir uso, reduzir custos, para proteger o meio ambiente como um todo, a saúde do trabalhador e dos consumidores.

Segundo Bag (2021), em seu estudo nas fábricas sul africanas, afirma que a teoria sugere o uso de ferramentas da I4.0 para aprimorar os resultados da sustentabilidade nas operações da cadeia de suprimentos e que os resultados demonstram que a I4.0 melhora a taxa de consumo de recursos, reduz o desperdício, diminui a poluição e a aprimorar as operações sustentáveis.

No segmento de eletrônicos, Terzi (2021) conceitua um estudo detalhado de economia circular utilizando I4.0 para a sustentabilidade dos eletrônicos com análises aprofundadas para solucionar a questão do lixo e dos materiais a serem reciclados e reutilizados em cadeias próprias ou outras, com estudos de caso de desmontagem com utilização de robôs citado por Galparoli (2021) e testes empíricos em laboratórios e análises e usos de materiais inclusive em MA com análise de cadeia de suprimentos e cálculos de produtos e materiais circulares.

Para Kumar (2021), em seu estudo sobre integração da I4.0 e sustentabilidade na cadeia de suprimentos, afirma que a circularidade de recursos, o aumento dos lucros de produtos verdes e o desenho dos processos para eficiência de recursos e energia foram considerados os principais critérios de sustentabilidade e as barreiras são a falta mão de obra qualificada que entende das tecnologias da I4.0, legislação e controle ineficaz, estrutura de desempenho ineficaz, falta de fundos e metas corporativas a curto prazo para integração da I4.0 com a EC e sustentabilidade.

Para Romero (2021), a EC tem base em concepções ecológicas, ecologia industrial e territorial, economia funcional, segunda utilização, reutilização, recuperação, reciclagem e valorização, mas faltam ainda estudos que demonstrem que estes pilares beneficiam positivamente os indivíduos garantindo a sustentabilidade. Ainda afirma que os países emergentes não têm uma estratégia para uso da I4.0 na EC das indústrias para aumentar o retorno financeiro e ambiental nas cadeias de suprimentos.

Segundo Gupta (2021), em seu estudo estruturado por economia circular, produção mais limpa e I4.0 avalia o desempenho sustentável, afirma que as organizações cada vez mais sofrem pressão para mudar para sistemas sustentáveis e que os estudos de caso da pesquisa demonstram que as práticas de economia circular são mais importantes para aumentar o desempenho de sustentabilidade na manufatura, seguidas por práticas de produção mais limpa e Indústria 4.0. A rastreabilidade/informações da cadeia de suprimentos, infraestrutura de reutilização e reciclagem, e ambiente natural e limpo foram as três principais práticas identificadas para organizações de manufatura com o objetivo de aumentar a sustentabilidade.

No segmento de solução de desperdícios de energia, Mastos (2021), afirma que nos últimos anos, práticas sustentáveis de gestão da cadeia de suprimentos têm sido adotadas por empresas que desejam reduzir os impactos ambientais e sociais negativos em suas cadeias de suprimentos e que modelos e soluções de economia circular assistidos por tecnologias da indústria 4.0 foram desenvolvidos para transformar produtos em fim de vida em novos produtos com diferentes usos. O redesenho das cadeias de suprimentos para a economia circular com o

uso de tecnologias da Indústria 4.0 pode permitir o gerenciamento da cadeia de suprimentos circular.

Segundo Fofou (2021), a remanufatura é uma operação que tem sido cada vez mais explorada nos últimos anos devido às suas inúmeras vantagens e à crescente necessidade de a sociedade promover uma economia circular que conduza à sustentabilidade. A remanufatura é uma das principais opções de fim de vida de produtos que podem levar a uma economia circular. A única opção de recuperação que mantém a qualidade de um produto novo é o surgimento da quarta revolução industrial, também conhecida como indústria 4.0, ajudará a aprimorar a aquisição e o compartilhamento de dados entre os diferentes estágios da cadeia de suprimentos, além de impulsionar as técnicas inteligentes de remanufatura.

Subramoniam (2021), documentou que 10 a 15% dos produtos de compras on-line são devolvidos e muitos desses produtos são descartados em aterros sanitários. As redes estão evoluindo, que os dados são coletados de todas as fases dos ciclos de vida do produto, desde o design, protótipo, fabricação, pós-venda de uso, devoluções, remanufatura e reciclagem com o objetivo de melhorar as cadeias de suprimentos reversas globais e a remanufatura com uma estrutura de ciclo de vida de produto digitalizado integrado com ferramentas digitais, às fases do processo de negócios, incluindo remanufatura e apoiado por estudos de caso do mundo real para profissionais e acadêmicos.

Na agricultura, Fernandez (2021) apresenta o estado atual e as tendências futuras de soluções tecnológicas inovadoras e ambientalmente sustentáveis para a cadeia alimentar pós-colheita e para a indústria alimentar, ao nível das embalagens ecológicas, ativas e/ou inteligentes devido ao forte aumento da compra/venda de produtos em plataformas online, bem como às exigências de segurança alimentar mais rigorosas. O estudo visa aumentar a conscientização global das micro, pequenas e médias empresas agroindustriais para a adoção de soluções alimentares inovadoras por meio da digitalização da indústria 4.0, logística associada e economia circular, sustentabilidade e preocupação com a cyber segurança e produtos informação, comunicação e extensão do prazo de validade.

Em um estudo de caso aplicado em 500 empresas, Khan (2021) afirma que a tecnologia de *blockchain* tem um efeito positivo nas práticas de economia circular por meio de contratos inteligentes com fornecedores e maior e mais transparente compartilhamento de informações, o que melhora significativamente a visibilidade na cadeia de suprimentos indicando resultados que as práticas de economia circular ajudam as empresas a melhorar seu desempenho ambiental e estimular seu desempenho financeiro, o que se transforma em maior desempenho

organizacional. Os resultados do estudo de futura aplicação de blockchain na economia circular e na gestão sustentável da cadeia de suprimentos poderá melhorar a sustentabilidade ambiental por meio do avanço na gestão de resíduos e práticas verdes. O estudo também é um alerta para os gerentes, ambientalistas, logísticos e órgãos reguladores dos países em desenvolvimento fortalecerem sua legislação ambiental integrando o avanço tecnológico.

Elghaish (2022), revela um crescimento notável na adoção e integração de tecnologias digitais da Indústria 4.0 para alavancar um sistema de economia circular na indústria da construção, mas a maioria dos corpos de pesquisa existentes fornece soluções conceituais em vez de desenvolver aplicativos viáveis e o futuro das cidades inteligentes. A união de diferentes tecnologias é altamente recomendada para permitir o rastreamento do desempenho dos ativos e componentes da construção (por exemplo, acessórios e componentes estruturais), o que permite aos usuários otimizar o valor de recuperação dos componentes, reutilizando ou reciclando-os *just in time* e estendendo vida operacional dos ativos.

Mukherjee (2022), afirma grandes vantagens de blockchain aplicadas em cadeias de suprimentos integradas com economia circular e Indústria 4.0: A tecnologia blockchain é conceituada como um tipo de tecnologia disruptiva e é considerada uma das principais ferramentas da Indústria 4.0 atualmente. Os vários recursos do blockchain, como contrato inteligente, descentralização, transparência, rastreabilidade, imutabilidade de dados e privacidade de dados, juntamente com um mecanismo de consenso, o tornam adequado para ser utilizado nas cadeias de suprimentos complexas e multiescalonadas de hoje. Os principais benefícios identificados são privacidade de dados, descentralização, imutabilidade de dados, contrato inteligente, sustentabilidade aprimorada, construção de cadeias de suprimentos resilientes, transparência e banco de dados compartilhados. Esses fatores melhoram os processos produtivos e tornam as cadeias de suprimentos existentes ágeis, resilientes e responsivas no longo prazo. blockchain também adiciona um aspecto de sustentabilidade que se correlaciona com o fenômeno da economia circular no mundo de hoje.

Rajput (2022), afirma que as indústrias estão caminhando para manter a produção e o consumo sustentáveis considerando a logística reversa, maximizando a geração de valor dos produtos em fim de vida e agilizando as operações de negócios de forma eficaz tornando importante integrar a economia circular e a logística reversa na cadeia de suprimentos existente para promover o meio ambiente e o crescimento econômico. Em sua pesquisa desenvolve um modelo matemático linear e considera a implantação dos sensores *IoT* para capturar as informações de produção em tempo real para transparência e precisão, para otimizar custos e

maximizar o fim de vida dos produtos para estabelecer uma instalação da Indústria 4.0 integrada a uma economia circular e rede de logística reversa.

Segundo Luthra (2022), a colaboração de gerenciamento na cadeia de suprimentos circular ainda inexplorada, é um meio eficaz de usar recursos de forma mutuamente benéfica e integra práticas sustentáveis na cadeia de valor. Afirma que as cadeias de suprimentos ainda são intocadas e as estratégias para superá-las não são mapeadas, é necessário aumentar a capacidade e a utilização ideal dos recursos para desenvolver cadeias de suprimentos circulares, facilitar as práticas de por meio de esforços colaborativos entre os setores, a formulação e regulamentação de políticas governamentais, o modelo colaborativo de captura de valor e as tecnologias da Indústria 4.0 são as estratégias mais eficazes para o gerenciamento, a colaboração entre as partes interessadas intersetoriais, destacando a importância da otimização de recursos por meio do gerenciamento de resíduos.

Segundo Krstic (2022), a economia circular é um modelo de produção e consumo, que envolve partilhar, alugar, reutilizar, reparar, reabilitar e reciclar materiais e produtos existentes durante o maior tempo possível, cuja eficiência depende muito das atividades e processos logísticos e as soluções e tecnologias da Indústria 4.0 que migra para o conceito de Logística 4.0 com objetivo de alcançar maior eficiência dos sistemas e atividades para operacionalizar as áreas de interesse de EC mais importantes que são: reutilização, remanufatura, reciclagem, gestão da cadeia de suprimentos e gestão do ciclo de vida do produto.

Segundo Khan (2022), a logística reversa tornou-se parte integrante das cadeias de suprimentos modernas, com muitas empresas investindo na economia circular com uma economia industrial recuperativa, efetiva, sustentável, com redução dos desperdícios, envolvimento de todos, funcionários qualificados, comprometimento e suporte da alta administração vão fornecer as diretrizes e caminhos para a implementação de EC e LR e I4.0, levando à competitividade de uma empresa.

No setor têxtil, Pal (2022) afirma que o segmento está aproveitando muitas tecnologias emergentes, estruturas digitais e os impactos da digitalização nas cadeias de suprimentos com discussão em relação ao desenvolvimento de design e amostragem, fornecimento, fabricação, distribuição, varejo, devoluções e processos de reutilização.

Krstic (2022) apresenta um cenário de desenvolvimento promissor da logística reversa com aplicação das tecnologias da I4.0 e EC nas cadeias de suprimentos. Os cenários implicam a integração das tecnologias mais eficazes da Indústria 4.0, como a internet das coisas, veículos

autoguiados, veículos autônomos, inteligência artificial, *big data* e mineração de dados, *blockchain*, computação em nuvem e eletrônicos/móveis.

Segundo Xie (2022), em qualificação de fornecedores, propõe um modelo multicritério para tomada de decisão na seleção de fornecedores verdes em sua cadeia de suprimentos, que cumprem os requisitos de sustentabilidade, econômico, ambiental e social, para a prática de EC utilizando tecnologias da Indústria 4.0.

Segundo Jamwal (2022), afirma em sua pesquisa que as organizações precisam rever sua cadeia de suprimentos na questão de manufatura para praticar a sustentabilidade com uso de *blockchain* (livros de registros) para manter transparência e rastreabilidade e propõe uma estrutura integrada para gerenciamento de energia, resíduos, recursos, qualidade e ciclo de vida.

Segundo Eisenreich (2022), em uma revisão sistemática da literatura apresenta em seu artigo contribuição de novos conhecimentos sobre a implementação de uma economia circular, analisando as implicações de soluções circulares para os processos da cadeia de valor de uma empresa, considerando a colaboração das partes interessadas, a percepção dos consumidores, Indústria 4.0, medição de desempenho, pensamento de ciclo de vida múltiplo, habilidades específicas da economia circular e uma alta administração e cultura corporativa de apoio.

Segundo Sahu (2022), afirma que as tecnologias da Indústria 4.0, incluindo digitalização, monitoramento em tempo real e capacidade de tomada de decisão, desempenham um papel significativo na implementação da economia circular e apresenta uma estrutura de transição que pode ser utilizada para aplicações em consumo de energias, de água e controle de tratamentos de água.

Segundo Fernando (2022), os tópicos da economia circular aplicada nos itens das cadeias de suprimentos nacionais e internacionais, podem ajudar a não gerar dependência total e aumento de custos por falta de demanda, realizando a integração com tecnologias digitais da I4.0.

Em uma indústria de sapatos Chang (2022), afirma que a aplicação de um modelo inteligente de produção rápida e sistema de integração virtual utilizando de tecnologias da I4.0 realiza a gestão do conhecimento inovador e a adoção de cadeias de suprimentos verdes. Isso não apenas reduz o custo das matérias-primas, mas também permite que a empresa produza materiais recicláveis para fornecer a usuários externos. As tecnologias da Indústria 4.0 conecta computadores em uma rede de sensores localizados na alimentação de matérias-primas, armazenamento, design, produção, remessa e sistemas digitais para que todos os subsistemas sejam integrados. Isso facilita a comunicação mútua, levando à integração de sistemas de

produção físicos e virtuais em um único sistema *Cyber Physical System* (CPS). Um CPS pode coletar *big data* de matérias-primas físicas, linhas de produção e mercados, analisar os dados e, em seguida, implementar uma série de habilidades relacionadas à inteligência, como autopercepção, memória, cognição, decisão e reconstrução para alcançar processos de fabricação totalmente inteligentes.

Para Bagalagel (2022), as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser usadas para simplificar a transição da economia linear para os sistemas de manufatura da economia circular por meio da coleta, análise e coordenação de dados de produtos e processos em vários estágios do sistema. Um modelo de estrutura auxilia os tomadores de decisão na identificação das tecnologias da Indústria 4.0 e suas interações em toda a cadeia de suprimentos fornecendo uma base para geração e avaliação de ideias em todo o sistema, em oposição a uma abordagem de implementação caso a caso isolada e descoordenada.

Para implementar cadeias de suprimentos circulares, aplicativos, comunicação, compartilhamento de informações para o planejamento e tomada de decisão, Gebhardt (2022) afirma que as tecnologias da I4.0, tais como *IoT*, *Blockchain* e *Cloud* são necessárias para habilitar o mecanismo de colaboração entre as partes interessadas dentro e fora dos limites da indústria para implementação de uma EC. Ainda, sugere pesquisas futuras ao longo de cinco dimensões principais: gêmeos digitais e inteligência artificial, criação e inovação conjunta de conhecimento, colaboração em design e planejamento de produtos.

Na agricultura, Yaqot (2022), afirma que as empresas agrícolas inteligentes e sustentáveis de hoje são baseadas na intercorrelação entre as tecnologias da I4.0 e os fundamentos da EC. Para a indústria agrícola e o consumidor humano é obrigatório considerar o projeto, a operação, os sistemas de fabricação, a logística, a cadeia de suprimentos e ações refazer (como reciclagem) e não refazer (como repensar) para reduzir as ineficiências que respeitem os aspectos econômicos, ambientais e sociais, com responsabilidade pelo crescimento de uma indústria e sociedade harmoniosas em um novo mandato I4.0-EC entrelaçado com preocupações de desenvolvimento sustentável, propondo através da Agricultura de Precisão (AP) a ligação mutuamente vantajosa entre AP e EC; o conhecimento detalhado das contribuições potenciais das tecnologias de AP para regenerar, compartilhar, otimizar, repetir, virtualizar e trocar por um modelo de EC; um plano de ação para estudos futuros integrando os princípios inteligentes de AP e CE com base em teorias de gestão da cadeia de suprimentos verde.

Em sistemas de produção automobilística, Yu (2022) afirma que a adoção de práticas de economia circular melhora o desempenho econômico e operacional da empresa, tem o potencial de trazer melhorias significativas nas operações comerciais e os resultados empíricos confirmam que a I4.0 desempenha um papel positivo na implementação de práticas de economia circular e na capacidade da cadeia de suprimentos. As práticas de economia circular fornecem evidências de um nexo positivo com o desempenho operacional e econômico da capacidade da cadeia produtiva, tem uma relação positiva com o desempenho operacional e tem uma associação insignificante com o desempenho econômico, enquanto o desempenho operacional melhora a saúde econômica. O trabalho de pesquisa fornece as diretrizes para que as empresas participantes possam atingir metas sustentáveis ao assimilar a indústria 4.0 nos sistemas de manufatura.

Segundo Godinho Filho (2022), apresenta a relação que existe na hierarquia entre a construção de um modelo estrutural da inter-relação da I4.0, economia circular e cadeia de suprimentos, e quando comparados existe uma forte relação mútua com uso da *IoT* e tecnologias de computação em nuvem que influencia a coleta de grandes quantidades de dados, levando ao *big data*, que por sua vez influencia o uso de ferramentas de análise de dados para obter vantagens competitivas, para contribuir com tomada de decisão mais assertiva dos gestores quanto à seleção, implementação e avaliação de projetos que adotam tecnologias da Indústria 4.0 e abordagens de economia circular nas cadeias de suprimentos, e ainda o estudo pode servir de base para futuras pesquisas empíricas para investigar como as empresas incorporam as tecnologias da Indústria 4.0 em seus processos e como isso influencia na busca por cadeias de suprimentos verdes.

Para aplicação dos conceitos de EC, Ivanov (2022) afirma que o gerenciamento da cadeia de suprimentos com utilização de dados em nuvem integra conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 e plataformas digitais emergentes criando serviços com cinco características: (I) dinâmica multi estrutural; (II) plataformas, cadeias de suprimentos digitais, ecossistemas e visibilidade, (III) composição dinâmica de serviços com funções de comprador/fornecedor que mudam dinamicamente, (IV) resiliência e viabilidade e (V) redes de suprimentos entrelaçadas e economia circular.

Em uma revisão utilizando a mineração de dados em textos de artigos de gestão cadeia de suprimentos com processos digitais, Tavana (2022) afirma que, os tópicos mais importantes na transformação digital são gestão sustentável da cadeia de suprimentos e economia circular e tecnologias da indústria 4.0. O estudo descobre ainda *big data*, análise de dados, *blockchain*,

inteligência artificial, aprendizado de máquina e a *IoT* como as tecnologias mais críticas para facilitar a transformação digital da cadeia de suprimentos. A transformação digital, o gerenciamento da cadeia de suprimentos, a indústria 4.0, a tomada de decisões e a sustentabilidade são tendências emergentes na digitalização da cadeia de suprimentos.

Para a cadeia automotiva, Mattos Nascimento (2022) propõe em um estudo empírico para utilizar a sucata de metal para produzir um pó metálico a ser usado como matéria prima de impressão de peças 3D utilizando da tecnologia de manufatura aditiva da I4.0 e conceito de economia circular e de cadeias de suprimentos inter-relacionadas.

Segundo Agrawal (2022), alguns pesquisadores sugerem a integração dos conceitos da EC e tecnologias da I4.0 e afirma que a implementação pode ajudar a melhorar o *design* dos produtos e serviços para prevenir e reduzir o desperdício de materiais, energia e buscar as metas da sustentabilidade. As práticas de EC permitem que os consumidores da cadeia de suprimentos devolvam os seus produtos após o uso em seu final de ciclo e utilizem os produtos com mais valor agregado. A integração das práticas de EC e I4.0 demonstra uma tendência futura de Inteligência Artificial (IA) para tomada de decisão, para melhorar a logística, a eficiência de recursos, segurança, qualidade de produto e reduzir carbono fóssil.

Segundo Hettiarachchi (2022), afirma em sua pesquisa que Manufatura Aditiva (MA) tem um foco de evolução tecnológica industrial a explorar aspectos facilitadores da economia circular (EC), considerando secundariamente a redução de desperdícios de materiais, reciclagem e possível reparos para aumentar a vida útil, e ainda, que existe uma relação de MA e EC que ainda necessita ser desenvolvida ao longo da aplicação da tecnologia.

Na aplicação de reciclagem no conceito EC utilizando a I4.0, Islam (2022) afirma que o modelo de negócio circular é um dos principais blocos de construção da economia circular (EC), e a reciclagem é uma das principais estratégias para alcançá-lo; A eficiência da gestão municipal de resíduos sólidos, o mecanismo de relatório do custo dos materiais reciclados, dos recicladores, o estabelecimento de um centro de plástico, a implementação da responsabilidade estendida do produtor, a parceria estratégica, os incentivos e o design do produto foram destacados como requisitos críticos para uma gestão eficiente, modelos de negócios operados por reciclagem, especialmente para resíduos de painéis fotovoltaicos solares, lixo eletrônico, resíduos têxteis e setor de veículos e baterias. Identificou os benefícios do uso de materiais reciclados na redução da pegada de carbono, no consumo de energia e na obtenção de baixo impacto ambiental. E tecnologias de impressão tridimensional, etiquetas *RFID* baseadas em sensores, gêmeos digitais, manufatura aditiva, Indústria 4.0 e Internet das Coisas (*IoT*) foram

encontradas como inovações tecnológicas de ponta aplicadas a modelos de negócios circulares orientados para a reciclagem.

Segundo Silva (2022), na tratativa de resíduos plásticos, afirma que no final da cadeia estudos de pirólise, modelos de negócios e I4.0 estão no início, tecnologias como computação em nuvem, inteligência artificial e internet das coisas podem trazer benefícios significativos na operacionalização, previsão e controle de fluxos, que se torna necessário entender o *modus operandi* da cadeia de suprimentos e os processos mais eficientes de reciclagem e reutilização do plástico que tem muita utilidade mas é recorrente os problemas em sua *end life*.

Segundo Zaman (2022), a gestão de resíduos contribui direta e indiretamente para todos os objetivos de desenvolvimento sustentável e a modernização do atual sistema de gerenciamento ineficaz por meio de tecnologias compatíveis com a Indústria 4.0 é necessária com urgência. O estudo desenvolve e testa um modelo de aprendizado de máquina para identificar e medir a contaminação de resíduos domésticos como uma aplicação de estudo de caso de gerenciamento de resíduos 4.0 e revela que o gerenciamento de resíduos 4.0 oferece várias oportunidades e benefícios de sustentabilidade na redução de custos, melhorando a eficiência na cadeia de suprimentos e no fluxo de materiais, reduzindo e eliminando o desperdício ao atingir metas holísticas de economia circular. Os dados sobre a contaminação dos resíduos são essenciais para os governos locais explorarem as práticas de reciclagem dos resíduos domésticos, além de desenvolverem métodos eficazes de educação e comunicação sobre os resíduos, e o gerenciamento de resíduos 4.0 pode ser uma ferramenta eficaz para a economia circular e a cadeia de suprimentos.

Mboli (2022), propõe um sistema de suporte à decisão habilitado para *IoT* e modelo de negócios de EC que efetivamente permite rastrear, monitorar e analisar produtos em tempo real com foco no valor residual, usando um modelo que investiga a natureza da realidade e da existência de acordo com o significado de cada produto para as etapas da economia circular

Para Delpla (2022), na era da Indústria 4.0, os desenvolvimentos no campo da internet das coisas (*IoT*) permitem a coleta de dados durante todo o ciclo de vida do produto para determinar os tratamentos ideais a serem aplicados após a recuperação do produto, propõe um modelo maximizando o lucro total da empresa de manufatura, selecionando o tratamento a ser aplicado aos produtos coletados de acordo com sua condição estimada pela coleta de dados do ciclo de vida possibilitada pela *IoT*. Um smartphone modular como estudo de caso propõe um modelo solução para o *loop* de retorno para atender a uma demanda de produtos reconicionados em vários períodos. Destaca-se ainda o interesse da utilização de dispositivos

inteligentes que preveem a degradação dos produtos durante o seu ciclo de vida. A implementação total dessa tecnologia de rastreamento inteligente em todos os produtos, e não apenas parcialmente, seria benéfica em mais de 5,3% para altos custos de remanufatura”

Nas indústrias do segmento de fabricação de alimentos, um estudo foi realizado em diversas empresas e Khan (2022) afirma que em meio às crescentes preocupações ambientais, a Indústria 4.0 e a tecnologia *blockchain* estão transformando as práticas de economia circular e os modelos de negócios predominantes. Primeiro, a Indústria 4.0 melhora significativamente as práticas de economia circular. Em segundo lugar, as práticas de economia circular ajudam a melhorar o desempenho ambiental das empresas, mas não estimulam o desempenho operacional. Em terceiro lugar, um maior desempenho eco ambiental aumenta significativamente o desempenho organizacional.

Na Indústria da moda, Akram (2022) propõe que a indústria da moda deve focar nas preocupações sociais e ambientais, onde deve criar produtos da moda para promover o consumo e a produção sustentáveis, utilizar de infraestrutura com inovação para realizar integração de tecnologias digitais, como a Internet das Coisas (*IoT*), inteligência artificial (IA), *blockchain*, realidade aumentada (RA) e realidade virtual (RV) para tecidos inteligentes (saúde), cadeia de suprimentos, economia circular, sistema de recomendação de vestuário, previsão de tendências de moda, previsão de saúde e experiência de compra virtual e aumentada.

Na cadeia de suprimentos alimentar, Jabbour (2023) após revisão da literatura, propõe o uso das tecnologias da Indústria 4.0 em modelos de gestão eficiente da economia circular nos métodos sistêmicos de reutilização e reciclagem de resíduos alimentares evitando perdas através de ciclos em vez para evitar e reduzir a geração de resíduos, perdas e desperdícios de alimentos, usando modelos de negócios de EC, como otimizar e compartilhar.

Na cadeia de abastecimento de peixes, valiosa para alimentação humana global, Hassoun (2023) indica a utilização de IA, *Big Data*, Sensores Inteligentes e *IoT* para aplicar conceito de economia circular para gerir os resíduos e subprodutos, criando a valorização dos resíduos desde o mar até a mesa do consumidor, considerando garantir um procedimento melhor das devoluções de produtos ao mar e mitigar os encargos econômicos e ambientais.

Na Indústria, Ghoreishi (2023), afirma que para o conceito de EC as empresas estão a criar e capturar valor na concepção inovadora do desenvolvimento sustentável de produtos e processos circulares com objetivo de reparação, renovação e remanufatura. Debates demonstram diferentes aplicações de IA, como aprendizado de máquina, automação e robótica,

e visões de máquina com capacidade de coletar, analisar e armazenar dados digitais para essa transição de produtos e processos circulares.

Segundo Yudi (2023), o setor manufatureiro parece estar mais focado na produção de base ambiental e utilizar a tecnologia da Indústria 4.0 para melhorar a eficiência do processo de remanufatura e o planejamento de compras, como sobras de materiais, produtos devolvidos e sucatas transformando resíduos em produtos de valor agregado utilizando a abordagem da economia circular 4.0.

Segundo Matenga (2023), os insumos e processos de fabricação estão interligados com uso das tecnologias da I4.0, possibilitando a rastreabilidade dos dados ao longo da cadeia de informação e valor para a gestão do conhecimento. Afirmar que a integração de tecnologias emergentes é estendida para o gerenciamento do ciclo de vida do produto utilizando o gerenciamento da cadeia de suprimentos, na fabricação parcial de peças de chapa plana em caixa para fabricação de vagões. Avaliou o ciclo de vida usado para rastreamento de peças e pedidos para remanufatura os vagões na cadeia de suprimentos.

Segundo Sindhwani (2023), as emissões de gases com efeito estufa continuam a aumentar na nossa atmosfera e o desejo de combatê-las tornou-se a necessidade do momento defendida por organizações em todo o mundo, para salvar o ambiente. Para descarbonizar a cadeia de abastecimento indica que a sustentabilidade é o critério mais importante e a computação em nuvem, as regulamentações governamentais, a implementação da economia circular e a capacidade da tecnologia blockchain são os facilitadores mais cruciais para a implementação da descarbonização da cadeia de abastecimento na indústria.

Um estudo de Karam (2023), determinou que em todos os cenários de um sistema de logística reversa inteligente em cadeias de abastecimento fechadas de economia circular levou à identificação do cenário que concilia de forma ideal a implementação generalizada das tecnologias da Indústria 4.0 com os recursos necessários.

Barreti (2023), em sua revisão identifica as relações e aplicações da tecnologia blockchain na gestão sustentável da cadeia de suprimentos e na logística reversa que apoia processos de reciclagem e reutilização de resíduos. Verificou-se que as tecnologias favorecem os processos sustentáveis, mitigando problemas intrínsecos nas redes logísticas e permitindo práticas circulares, mas enfrenta barreiras como a baixa consciência ambiental, a descrença na eficácia desta tecnologia e a baixa capacidade técnica dos recursos humanos.

O estudo de Sharma (2023), examina as relações entre práticas de logística verde, tecnologias I4.0 e Economia Circular e as partes interessadas esperam implementar logística

sustentável e práticas circulares para lidar com estas questões críticas, como geração de resíduos, escassez de recursos, uso de recursos renováveis e mudanças climáticas.

De Oliveira Neto (2023), em seu estudo indicou onze proposições baseadas em tecnologias da Indústria 4.0, ferramentas de ecoeficiência e economia circular que ajudam gestores e pesquisadores a promoverem uma forte sustentabilidade. As implicações teóricas do estudo consistem em: produção mais limpa, que foi a ferramenta mais utilizada em conjunto com as tecnologias da Indústria 4.0 para potencializar a economia circular. A simulação e internet das coisas, que são mais apropriadas para o design ambiental e ecodesign. A internet das coisas, que possibilitou a estruturação da logística reversa e do *big data*. E a computação em nuvem, que gerou um sistema de seleção de fornecedores na cadeia de suprimentos verde.

Na indústria farmacêutica, Tsolakis (2023) afirma que o cultivo de algas é uma opção de matéria prima renovável e o e as tecnologias da Indústria 4.0 nas cadeias de abastecimento poderiam operacionalizar a economia circular e promover o desenvolvimento sustentável.

Tiwari (2023), afirma que as tecnologias da Indústria 4.0 e a economia circular foram estabelecidas para converter produtos em fim de vida em novos com uma variedade de aplicações. O uso coordenado dos conceitos CE e I4.0 podem aumentar a eficiência e a competitividade da cadeia de abastecimento.

Para reciclagem de baterias de lítio final de vida, Tripathy (2023), afirma em sua pesquisa que a economia circular tem sido cada vez mais vista como uma forma de combater esta crise, ampliada ainda mais pela operacionalização das tecnologias da Indústria 4.0 em torno do resultado da sustentabilidade com leis de reciclagens e cadeias de suprimentos preparadas para tratar fatores ambientais.

Em função da escassez de recursos no futuro, principalmente de metais extraídos dos minérios da terra em função da grande escala de produção de produtos eletrônicos, Patil (2023) afirma a necessidade de uso de tecnologias da I4.0 e a motivação de agregar valor aos resíduos para aplicação de economia circular e seus conceitos de reciclagem e reuso nas cadeias produtivas dos metais dos produtos fim de vida.

O objetivo da União Europeia é que as empresas zerem suas emissões de carbono até 2030 e para a siderurgia de aço com alto consumo de energia Tolentini (2023) afirma que além do uso *IoT* e *Big Data* a implementação de uma estratégia de sustentabilidade é possível com parcerias nas cadeias de suprimentos aplicando práticas de economia circular revendo os modelos de negócios e colaborações inovadoras podem trazer crescimento econômico sustentável.

O processamento de alimentos desde a produção agrícola até o consumo doméstico gera grandes quantidades de resíduos que polui solo, água e ar. A economia circular é uma alternativa para uma cadeia de suprimentos sustentável. Gonçalves (2023) afirma que é necessário foco em ações da EC no desperdício na gestão de reuso e valorização dos resíduos alimentares, na pegada de carbono e segurança alimentar, nas estratégias de mitigação de impactos ambientais e emissões de gases de efeito estufa, na otimização de processos para diminuição do uso de recursos naturais e resíduos, integrando essas ações circulares ao uso da Indústria 4.0 como *IoT*, *big data* ou técnicas de aprendizado de máquina para melhoria de toda a cadeia de abastecimento, desenvolvimento de plataformas colaborativas de produção e mercado, utilização de resíduos ou coprodutos através da concepção de circuitos intra ou intercadeias e troca de processos ou insumos com elevados impactos ambientais por outros mais verdes.

Na indústria de vestuário, uma das áreas que mais impacta o meio ambiente, Karmaker (2023) afirma que as tecnologias da I4.0 impactam positivamente o desempenho da cadeia de suprimentos sustentáveis e nas práticas de economia circular. Demonstra a implementação de tecnologias avançadas e práticas de produção com abordagens sustentáveis, promovendo assim o desempenho ambiental e socioeconómico.

As empresas agrícolas inteligentes e sustentáveis tem correlação entre tecnologias da I4.0 e os fundamentos da economia circular. Yagot (2023), apresenta que a Indústria deve respeitar a sustentabilidade e as ações exigem o refazer (como reciclagem) e de refazer (como repensar) para reduzir as ineficiências dos excessos humanos na economia e os impactos no ambiente. O estudo demonstra como as tecnologias I4.0 de última geração poderiam promover iniciativas de EC na indústria agrícola, abordando tais tecnologias como base para a chamada agricultura de precisão.

Em seu estudo com base na literatura, Khan (2023) conecta a logística reversa a economia circular no contexto da Indústria 4.0 e desenvolve uma estrutura hierárquica para explorar a relação entre os fatores críticos de sucesso identificando cadeia de blocos, plataformas digitais e colaboração sustentável entre empresas.

Kumar (2023), afirma que as tecnologias da I4.0 pode melhorar a coordenação das cadeias de suprimentos, mas a cadeia circular de recomércio ainda não foi completamente explorada. Em seu estudo, demonstra a empresa de reforma baseada em aplicativos móveis, adquire itens em fim de vida/fim de uso dos clientes, os recondiciona e os revende aos usuários finais usando uma plataforma de revenda online. Este estudo investiga os efeitos do

prolongamento da vida útil do produto e do valor dos recursos de produtos em fim de vida/fim de uso no desempenho do canal na era da indústria 4.0. A questão dos conflitos de canal, preços de produtos reconicionados e melhoria da qualidade dos itens reconicionados com garantia foi abordada. Além disso, construímos quatro cenários alternativos: modelos centralizados, descentralizados, de partilha de receitas e de contratos tarifários em duas partes e comparamos os resultados para decidir qual dos cenários é o melhor.

As garrafas não reutilizáveis de plásticos Pet são uma grande preocupação ambiental e um problema de acúmulo de resíduos descartados de forma incorreta. Rajabi-Kafshgar realiza um estudo para uso desse material reciclado e reusado como material para manufatura aditiva 3D e afirma que é essencial uma rede robusta da cadeia de abastecimento que facilita a reintegração de resíduos de garrafas de plástico e subprodutos de impressão 3D na cadeia de valor, mas também proporciona benefícios ambientais, sociais e económicos significativos, alinhando-se com os princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular e de ciclo fechado.

No estudo de pesquisa da indústria de automóveis Piepoli (2024), analisou as tecnologias da I4.0 aplicadas em economia circular nas cadeias de suprimentos de forma indireta a performance da empresa. A I4.0 é transformadora e têm o potencial de melhorar o seu desempenho empresarial global, promover uma maior colaboração dentro do ecossistema da cadeia de abastecimento e, assim, fortalecer a sua vantagem competitiva. Como a natureza exploratória desta investigação é impulsionada pela exploração de caminhos, também foram discutidos temas como a implementação de tecnologias I4.0, o seu impacto no desempenho empresarial e questões atuais importantes da indústria, como a economia circular, concluindo que a implementação de tecnologias I4.0 leva direta e indiretamente a uma produção mais sustentável e a uma gestão eficiente de recursos, uma vez que as tecnologias I4.0 são concebidas para serem eficientes em termos energéticos e reduzirem as emissões.

Uma mudança de processo para produção de materiais que utilizam polímeros, é um ponto chave para reduzir impactos ambientais. Delgado-Arcano (2024) traz um estudo em laboratório de biorefinaria propondo substituir a matéria prima fóssil. O desenvolvimento de ferramentas tem permitido a melhoria dos processos industriais utilizando tecnologias da I4.0 que geram digitalização, automatização e otimização dos processos, incluindo a logística em toda a cadeia de abastecimento e produção, e estas ferramentas podem contribuir para a implementação da economia circular e para o desenvolvimento de processos sustentáveis.

Nas atividades da logística, El Jaouhari (2024) apresenta um sistema de gerenciamento de armazém com base nos pilares da economia circular e uso de tecnologias da I4.0 na prática com estratégias sustentáveis para mitigar os efeitos sociais e ambientais adversos nos seus armazéns. O sistema de gerenciamento de armazém circular possibilitou o processo de reciclagem, o conhecimento, a excelência operacional, a otimização, a virtualização e a tomada de decisões inteligentes por modelos e soluções de economia circular utilizando inteligência artificial e pelas tecnologias da internet das coisas em uma cadeia de suprimentos automotiva do mundo real para avaliar o desempenho de sustentabilidade.

Junaid (2024), apresenta resultados de uma pesquisa em empresas, de quais impactos das tecnologias para a sustentabilidade nas cadeias de abastecimento e das práticas da economia circular. As tecnologias da I4.0 permitem rastreamento de materiais e produtos em tempo real na cadeia de abastecimento, otimização da utilização de materiais, a promoção de cadeias de abastecimento de circuito fechado e a permissão do design circular de produtos que melhoram a economia circular mostrando uma relação positiva entre I4.0, EC e SC.

As cadeias de abastecimentos com fabricação circular fechada é a estratégia do pilar redução de resíduos e essencial a sustentabilidade. Ventura (2024), afirma que o uso da tecnologia de blockchain para fluxo de informações de relacionamentos das simbioses de subprodutos e resíduos torna as matérias primas para outras empresas. É fundamental o uso de tecnologias para operacionalização das cadeias de abastecimentos circulares com redução de resíduos e preservação de recursos.

Na indústria de vidros, Ardakani (2024) demonstra implementação da economia circular e a Indústria 4.0 para redução de resíduos e otimização de recursos nas fábricas de vidro iranianas que não são eficientes deste ponto de vista. As contribuições teóricas destacam a importância de facilitadores específicos na implementação bem-sucedida da gestão circular da cadeia de abastecimento 4.0.

Sorooshian (2024), em seu estudo apresenta um “modelo de programação linear inteira para projetar uma rede sustentável, considerando práticas de economia circular, a tecnologia da Internet das Coisas (*IoT*) e o roteamento de localização rastreável, coleta e entrega na indústria de baterias para veículos elétricos. O modelo proposto localiza centros de distribuição para reciclagem e considera o problema de roteamento a estratégia entre os centros de distribuição e os prestadores de serviços. Ao aplicar o método de restrição épsilon aumentada, é estabelecido um equilíbrio entre a minimização dos custos totais e das emissões de carbono, e um conjunto

de soluções ótimas de Pareto é fornecido e o resultado demonstrou a precisão do desempenho do modelo proposto.”

Uma pesquisa em startups do ramo de alimentação, da Silva (2024), constatou que a incorporação de tecnologias como automação, big data, biotecnologia e Internet das Coisas, promovem iniciativas de economia circular contribuindo para a inovação e eficiência nos processos, sendo um modelo de laboratório ágil e inovador que pode servir de exemplo para empresas maiores. O estudo apresenta barreiras e oportunidades para desenvolver as economias circulares no setor de alimentação.

Bag (2024), afirma que as empresas que implementam big data e análise preditiva são mais propensas a compartilhar informações e aumentam a conectividade relacionadas com a economia circular com as partes interessadas, resultando num aumento da confiança e do envolvimento contribuindo com a sustentabilidade social das cadeias de abastecimento.

Sánchez-Garcia (2024), afirma que os resultados destacam o papel transformador das novas tecnologias, especialmente a blockchain e a inteligência artificial, no avanço da economia circular, e conclui que as novas tecnologias prometem uma maior eficiência dos recursos, cadeias de abastecimento otimizadas, modelos de negócio inovadores e uma melhor gestão do ciclo de vida dos produtos, oferecendo profundos benefícios económicos e ambientais, ao mesmo tempo que promovem o consumo sustentável e a inovação colaborativa

Na cadeia de abastecimento alimentar, Kumar (2024), afirma que as aplicações I4.0 podem ser usadas para rastreabilidade, rastreamento, inspeção e monitoramento de qualidade, monitoramento ambiental, agricultura de precisão, otimização de insumos agrícolas, automação de processos, etc., para melhorar a circularidade e a sustentabilidade das cadeias agrícolas alimentares que apresenta as barreiras e dificuldades para aplicação.

Para aplicar economia circular em baterias de veículos elétricos, para mitigar poluição de ar e água na cadeia de fabricação e no produto fim de vida, Thomaz (2024) demonstra uma reciclagem inteligente e o tratamento de águas residuais sustentáveis. Para conseguir equilíbrio econômico, ambiental e social, o estudo apresenta um investimento nas tecnologias da I4.0 com fabricação em robótica, purificação de águas por osmose reversa e tecnologias de redução de emissões e processos de retrabalho, reutilização e reciclagem no final da vida.

A indústria da moda é uma das que mais impactam a sustentabilidade por dependência de recursos naturais, uso de produtos químicos e exploração de trabalho nas cadeias de abastecimento. Casciani (2024), cria um “*Lab fashion 4.0 of Process Desing*” de processos produtivos para desenvolver apoio as empresas do ramo na transição da oportunidade de utilizar

as tecnologias digitais da I4.0 para sistemas circulares, mais ecológicos e digitais mitigando impactos ambientais.

Segundo Khalife (2024), o *Blockchain*, um banco de dados de registros transparentes, favorece a economia circular nas cadeias de suprimentos sustentáveis de pequenas e médias empresas devido às suas características como exposição, responsabilização, gestão de relacionamento, contratação inteligente, métodos benéficos aos aspectos ambientais, sustentabilidade ecológica e económica para o desempenho empresarial.

Kumar (2024), estuda modelos de contrato de consignação híbrida com aplicação de *IoT* em *recommerce* para economia circular das cadeias de suprimentos. Os resultados demonstram uma plataforma de *recommerce* consegue uma coordenação perfeita através do contrato híbrido e obtém uma otimização de Pareto única e propor um sistema habilitado para *IoT* em que os recursos não são desperdiçados, proporcionando assim uma forma de as empresas utilizarem o conceito de economia circular para atingirem objetivos de sustentabilidade.

Para a sustentabilidade da Indústria farmacêutica, Schneikart (2024) afirma que a União Europeia tem obrigação a reduzir significativamente os resíduos através de soluções inovadoras da economia circular. O estudo considera alguns cenários específicos e um dos fatores a serem considerados são os itens de transporte retornáveis que depende de um processo robusto de logística reversa integrados com tecnologias inteligentes e alinhamento das partes interessadas.

Na produção de cobre e lítio, para não aumentar mais a temperatura do planeta com o aumento da produção, Negrete (2024) desenvolve uma pesquisa para identificar os impactos na sustentabilidade nas ações de descarbonização dos processos considerando mudanças de eletrificação, mudança de combustível, economia circular, gerar energia de baixo carbono e mudanças de tecnologia para eficiência energética comparados aos objetivos da ODS gerando ações como contribuição para alterações climáticas.

Segundo Matarneh (2024), afirma que as empresas adotaram a economia circular e as tecnologias da I4.0 nas cadeias de suprimentos de forma estratégica para alcançar desenvolvimento sustentável. Isto envolve transformar produtos usados em novos itens com diferentes utilizações, redefinir a forma como os produtos são concebidos, fabricados, distribuídos e eliminados, destacando a importância da integração de capacidades dinâmicas das cadeias de suprimentos nas estratégias I4.0 e EC.

Nas empresas de correios “*post*” Masadeh (2024), pesquisa blockchain na digitalização das cadeias de fornecimento para digitalizar a economia circular na transparência, na rastreabilidade e nos processos digitais em logística, promovendo a sustentabilidade através da

redução de resíduos e melhor reutilização. Os resultados mostram que a tecnologia blockchain pode melhorar a segurança, rastreabilidade e eficiência das cadeias de fornecimento de correio, reduzir roubo, risco de erro e fraude, bem como facilitar a automação de processos específicos através de contratos inteligentes.

As tecnologias da I4.0 aplicadas com base nos pilares da EC nas CS são recentes, com a maioria dos artigos publicados a partir de 2020. A maioria desses artigos são pesquisas conceituais e estratégicas, sem aplicações empíricas específicas.

“Os resultados demonstram, em uma revisão sistemática da literatura de EC, que 40,5% dos artigos utilizam técnicas documentais de análise de conteúdo com revisão de literatura no campo acadêmico-científico e aplicações específicas; 28,4% utilizam questionários sobre opiniões e atitudes em relação à EC e energia renovável; 20,3% empregam técnicas de observação de tecnologias para novos materiais, processos e produtos para EC; 13,5% envolvem conversas e discussões em grupo para entender melhor a EC; e apenas 2,7% utilizam técnicas de experimentos e inovações.” (Alcocer, 2021, p. 1).

O uso das tecnologias da I4.0 nos pilares da EC é uma tendência futura para otimizar a sustentabilidade. Até recentemente, as empresas aplicavam essas tecnologias apenas para melhorar resultados financeiros, considerando a sustentabilidade apenas como uma possível vertente de melhoria econômica.

Os artigos que apresentam a aplicação de I4.0 nos pilares da EC em segmentos empresariais específicos são menos da metade, deixando várias oportunidades para pesquisas aplicadas empíricas com multidisciplinaridade de TI. A maioria dos artigos menciona I4.0 sem especificar a tecnologia utilizada, com algumas exceções, como IoT, blockchain para solução de registros, big data, IA/simulação, cloud, MA, sensores, CPS, robôs, entre outros.

Os artigos identificaram a reciclagem como o principal pilar de aplicação de I4.0 na EC, seguido pelo conceito geral de EC para todos os pilares. Em seguida, destacam-se a reutilização de produtos e materiais, o tratamento de produtos no fim da vida útil, a redução do uso de recursos e materiais, o desenvolvimento de produtos com conceitos de EC, repensar fornecedores e processos com base em EC, aplicar logística reversa para operacionalizar os pilares de EC e os mais complexos de remanufatura, reparação com consertos de qualidade, compartilhamento e aluguel, que necessitam superar barreiras de posse e valor da posse.

Para (Agrawal, 2023, p. 1), “o conceito de economia circular (EC) tem ganhado atenção significativa para lidar com os desafios da sustentabilidade na cadeia de suprimentos (CS). As práticas de EC oferecem abordagens inovadoras para otimizar vários processos de CS, levando ao crescimento sustentável.”

(Di Maria, 2022, p. 628) afirma que “o efeito direto das tecnologias de processamento de dados e tecnologias de fabricação inteligente na EC demonstra que a digitalização tanto do fluxo de materiais quanto do fluxo de informações permite que as empresas alcancem metas amplas de EC. Essas tecnologias digitais são as principais

responsáveis por alterar o fluxo de informações dentro das empresas, que tem um papel central na EC.”

Além disso, foi descrita uma lista de citações e oportunidades para pesquisas futuras de aplicação da I4.0 nos pilares da EC nas cadeias de suprimentos específicas para estudos de casos empíricos e soluções diversas de sustentabilidade funcional e operacional. As publicações são recentes, com tendências crescentes, e as empresas estão sendo forçadas a solucionar questões ambientais e sociais.

As pesquisas demonstraram que existem muitas oportunidades de casos empíricos a serem explorados para aplicação de I4.0 nos pilares da EC nas cadeias de suprimentos para a sustentabilidade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para propor o modelo de Sistema de Gestão Ambiental (SGA) com base nos pilares da Economia Circular (EC) utilizando tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) nas Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS), foram utilizadas pesquisas metodológicas com investigação intervencionista e pesquisa-ação. O objetivo é propor um modelo estruturado a ser aplicado por entidades governamentais, empresas e sociedade para alcançar a sustentabilidade futura do planeta.

“Pesquisa metodológica é o estudo que se refere a instrumentos de captação ou manipulação da realidade. Está, portanto, associada a caminhos, formas, maneiras e procedimentos para atingir determinado fim.” (Vergara, 2009, p. 42)

“Pesquisa com investigação intervencionista tem como principal objetivo interpor-se e interferir na realidade estudada, para modificá-la. Não se satisfaz, portanto, em só explicar. Distingue-se da pesquisa aplicada pelo compromisso de não somente propor resoluções de problemas, mas também os resolver de forma efetiva e participativa.” (Vergara, 2009, p. 43)

“Pesquisa ação é um tipo particular de pesquisa participante e pesquisa aplicada que supõe intervenção participativa na realidade social.” (Vergara, 2009, p. 44)

O método apresenta uma sequência para desenvolvimento do modelo de SGA com base nos pilares de EC aplicando as tecnologias da I4.0 nas CSS.

3.1 SITUAÇÃO PROBLEMA DA PESQUISA

As pesquisas em artigos descreveram afirmações sobre as aplicações, dificuldades, ações e tendências futuras da integração das tecnologias da I4.0 em EC para a sustentabilidade em um SGA nas CSS. Os autores afirmam que a utilização e o consumo desordenado de recursos naturais, além dos impactos ambientais e da poluição do meio ambiente, são questões que precisam ser urgentemente abordadas.

“Nos últimos anos, a mudança climática causada pela atividade humana tornou-se uma ameaça real para todas as espécies que vivem neste planeta. O aumento da temperatura terrestre, as inundações e o degelo são algumas das consequências visíveis deste problema. O previsível crescimento da população a nível global representa um desafio para as empresas e instituições na produção e fornecimento de recursos e serviços de forma sustentável, colocando a necessidade de desenvolver medidas universais focadas no desenvolvimento a longo prazo do planeta. Adicionalmente, estima-se que o consumo de recursos e materiais a nível global duplique até 2060, aumentando consideravelmente a quantidade de resíduos produzidos pelo ser humano. Todas essas mudanças representaram um desafio para as empresas e organizações no futuro.” (Alcocer, 2021, p. 1)

O aumento do consumo de energia, bens e serviços exigirá a implementação de estratégias sustentáveis e a busca de tecnologias eficientes que contemplem a implementação de modelos regenerativos para minimizar o impacto ambiental. A economia circular (EC) e a bioenergia são duas soluções inovadoras para combater as

alterações climáticas e reduzir o impacto ambiental com base na simplificação dos processos produtivos e na utilização de energias renováveis. Ambas as medidas se posicionam como soluções complementares para alcançar modelos eficazes e sustentáveis de produção e consumo.” (Alcocer, 2021, p. 2)

Para a EC, ainda é incipiente os pilares aplicados nas cadeias de suprimentos para a sustentabilidade das organizações.

“O aumento da competição econômica global e a crescente importância das questões ambientais forçam os fabricantes a considerar a implementação de cadeias de suprimentos de circuito fechado, garantindo a recuperação de produtos em fim de vida para reciclagem ou reutilização, porém estão sujeitos a muitas incertezas em seus fluxos, dadas as condições variáveis dos produtos fim de vida.” (Delpa, 2022, p. 1)

As dificuldades e barreiras estão presentes em todos os pilares da Economia Circular (EC), como na gestão do desenvolvimento de produtos para uma economia circular fechada, economia de recursos, remanufatura, locais de conserto e reúso, pontos de reciclagem para aumentar as fontes reais de matéria-prima, sistema estruturado de atividades de logística reversa e integração de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS) e Cadeias Industriais Sustentáveis (CIS) com uso das tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0).

Ainda é muito difícil criar um ciclo fechado de um produto ou serviço no fim da vida útil. Aplicar os princípios dos 8Rs+ e da EC é algo bastante distante na prática, porém a utilização integrada das tecnologias da I4.0 pode facilitar e apresentar uma perspectiva futura para a sustentabilidade.

“As empresas geralmente não têm certeza de como as soluções circulares afetarão sua organização. As incertezas devido a um projeto em vários ciclos de vida e uma complexa interconexão com diversas partes interessadas tornam os efeitos da economia circular difíceis de prever e que a estrutura linear definida de (Porter, 1985 apud Eisenreich, 2022, p. 1), não é suficiente para refletir práticas circulares de negócios, exigindo mudanças em direção a uma visão circular e interconectada.” (Eisenreich, 2022, p. 1)

O conceito de aplicar a Economia Circular (EC) para alcançar a sustentabilidade frequentemente enfrenta obstáculos devido ao fato de que os aspectos econômicos de uma organização geralmente são considerados mais importantes do que os apelos ambientais e sociais. Além disso, o uso das tecnologias da Indústria 4.0 ainda é bastante limitado quando se trata da aplicação da EC para a sustentabilidade.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, publicada em 2010, há uma década, não menciona obrigações de aplicar o conceito de EC para a sustentabilidade nas empresas e municípios, e não faz referência ao possível uso de tecnologias da Indústria 4.0 para o desenvolvimento e implementação de projetos na prática.

Segundo Khan (2022), para resolver o problema de sustentabilidade com base no conceito de economia circular:

“Deve haver motivação das partes interessadas a injetar tecnologias da Indústria 4.0 para obter benefícios econômicos, ambientais e operacionais. Os órgãos governamentais devem impulsionar a infraestrutura tecnológica para a legislação ambiental, pois a adoção da infraestrutura tecnológica permite aos órgãos governamentais administrar com eficácia o mecanismo de recompensas e punições das empresas, bem como auxiliar na gestão do histórico das empresas em relação às suas iniciativas ecológicas.” (Khan, 2022, p. 1)

Portanto, é confusa a aplicação dos métodos e estratégias quando se pensa na cadeia de suprimentos completa de um determinado produto e os recursos necessários para aplicar a EC.

Segundo Krstic (2022), a logística reversa tradicional é incapaz de lidar com as exigências das cadeias de suprimentos modernas e requer a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0, o que tornaria a EC mais eficiente.

Em um dos tópicos fundamentais para aplicação da EC na cadeia de suprimentos, os estudos de logística reversa e uso de tecnologias têm sido alvo de investigação menores do que custo e nível de serviço ao cliente. Estudos que investigam as tecnologias da Indústria 4.0, a sustentabilidade do impacto da logística reversa deve ser aumentada. Estudos futuros poderiam fixar mais esse alvo focando em práticas sustentáveis e analisando o impacto da prática e estratégias sobre o desempenho da logística reversa.” (Agnusdei, 2022, p. 12)

A aplicação da EC na cadeia de suprimentos apresenta barreiras como planejamento, administração, facilitação, conhecimento, tecnologias e pouco investimento em comunicação de dados.

Outro ponto deficitário na aplicação de pilares da EC é a questão da conscientização organizacional e educação ambiental nos 6Rs, que contempla desde o desenvolvimento do produto, o uso de recursos nos processos industriais, o uso, reuso, reciclagem e o descarte do produto no fim de sua vida útil.

“Os resíduos industriais são um problema perigoso, especialmente quando não tratados. A rápida diversificação da indústria em todos os domínios é acompanhada por desperdícios que requerem atenção imediata. Esses resíduos, perigosos e não perigosos, foram abordados parcialmente por meio da adoção dos 3Rs - Reduzir, Reutilizar e Reciclar. No entanto, essas estratégias, quando atendidas de forma independente, ignorando o efeito de rede, resultaram em sucesso limitado. uma interação entre as indústrias localizadas particularmente nas zonas industriais, onde a troca de resíduos pode servir como uma matéria-prima potencial e as fontes de energia podem ser integradas para um benefício mútuo entre as empresas participantes.” (Mukherjee, 2022, p. 35)

As cidades, empresas, cooperativas e sociedade ainda não têm uma integração total na cadeia de suprimentos, na economia circular e no uso de tecnologias da Indústria 4.0, gerando resultados insatisfatórios para a sustentabilidade. Segundo reportagem de Granda (2022) da Agência Brasil, o índice médio de reciclagem no Brasil é de apenas 4% de todos os materiais residuais denominados como lixo que lotam os aterros, o que não difere das cidades com menor desenvolvimento ambiental.

Além disso, a industrialização falhou durante uma década em relação às tecnologias para a sustentabilidade global, não considerando o conceito de economia circular em suas cadeias de suprimentos. Apenas alguns monitoramentos de processos foram aplicados, trazendo a otimização da manufatura sem considerar a vida útil do produto e seus subprodutos pós vida útil.

3.2 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

Os artigos analisados sobre a aplicação da I4.0 nos pilares da EC demonstraram que a maioria dos estudos ainda são conceituais, com poucas aplicações empíricas de algumas tecnologias em pilares isolados da EC, em locais específicos, sem nenhuma integração estruturada para Cadeias de Suprimentos Sustentáveis.

“O impacto da adoção da tecnologia da Indústria 4.0 na fabricação sustentável e na economia circular tem sido pouco pesquisado.” (Bag, 2022, p. 864)

“...mais pesquisas aplicadas são necessárias para promover a adoção da EC nas cidades existentes e na infraestrutura que as conecta ...A maioria das pesquisas fornecem soluções conceituais em vez de desenvolver aplicativos viáveis e o futuro das cidades inteligentes” (Elghaish, 2022, p. 1)

“A interação EC e I4.0 é um tema em evolução em trâmite de conceituação para testes empíricos utilizando os tópicos da Cadeia de Suprimentos Circulares (CSC). “O estudo sugere que os pesquisadores estão interessados em entender a transição e seus fatores críticos, apresentando estruturas e incorporando EC com tecnologias digitais. As tecnologias digitais implicadas são Tecnologia Industrial (IR) 4.0, *Big Data*, Internet das Coisas (*IoT*), Inteligência Artificial, *Blockchain* e *Data Analytics* para aumentar o desempenho organizacional e ambiental.” (Khan, 2022, p. 1)

A integração das tecnologias da Indústria 4.0 e da Economia Circular é considerada necessária para suportar e operacionalizar as Cadeias de Suprimentos Circulares com o objetivo de obter resultados promissores para a sustentabilidade.

“Diante dos crescentes assuntos ambientais, as tecnologias da Indústria 4.0 baseadas em IoT estão alterando as práticas de EC e os modelos de negócios existentes, de acordo com o Fórum Econômico Mundial. os resultados mostram que as práticas de negócios ecologicamente corretas ajudam a melhorar o desempenho ambiental da empresa, ao mesmo tempo em que estimulam seu desempenho econômico; e o melhor desempenho ambiental tem uma influência positiva significativa no desempenho da empresa.” (Sun, 2022, p. 1)

“As tecnologias I4.0 permitem uma transição bem-sucedida para EC. As tecnologias I4.0 têm grande potencial para melhorar a produtividade, reduzir os impactos ecológicos, alcançar uma produção mais limpa e mitigar os riscos do negócio.” (Katangle, 2020, p. 1)

“A tecnologia digital é considerada um meio promissor de mover a produção e o consumo para a economia circular. No entanto, ainda não está claro quais funções das tecnologias digitais são mais úteis para melhorar a circularidade e como essas funções

podem ser usadas para aprimorar diferentes estratégias de economia circular.” (Liu, 2022, p. 2171)

“O interesse de pesquisa em modelos de economia circular digital está em constante crescimento, especialmente pelo estudo do impacto e das implicações dos princípios circulares e das tecnologias da Internet das Coisas na sociedade moderna.” (Voulgaridis, 2022, p. 1)

Os estudos recentes demonstraram a importância da aplicação das ferramentas digitais da Indústria 4.0 na economia circular, mas a efetividade dessa aplicação nos pilares com resultados reais ainda é limitada, permanecendo principalmente na fase de estratégia e potencialidades.

“A Indústria 4.0 e a economia circular são as duas grandes áreas da atual indústria manufatureira. No entanto, a adoção e implementação da Indústria 4.0 e da economia circular em todo o mundo ainda estão em estágio inicial de desenvolvimento e os resultados revelaram que poucos estudos consideraram as questões de adoção e implementação da Indústria 4.0 e da economia circular.” (Sahu, 2022, p. 897)

É necessário criar a integração das tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas para cada Cadeia de Suprimentos Circular e conseguir atingir a operacionalização dos pilares da Economia Circular para a sustentabilidade. De fato, é importante desenvolver um sistema de desenvolvimento de produtos com base em informações para utilização de materiais e aumento de uso valorizando o produto, com reformas, consertos, reúso, locação e compartilhamento para a sustentabilidade.

As leis e políticas ambientais governamentais devem ter ações não apenas em torno de programas de reciclagem, que nem sempre são eficazes e eficientes, gerando poluição de solos, águas e ar, mas também em outros pilares da Economia Circular.

É importante ações efetivas para leis governamentais considerando os pilares da Economia Circular, inclusive atualização da Política Nacional de Resíduos Sólidos para conseguir melhorar a reciclagem das cidades, diminuindo os aterros e contaminações de solos e águas.

“Sugerimos que o governo desenhe uma política de gestão de resíduos incorporando práticas de economia circular. Um sistema de economia circular também pode reduzir o desperdício reutilizando ou reciclando e remanufaturando resíduos, levando à sustentabilidade dos negócios. Por meio desse sistema, as empresas de manufatura podem trabalhar diretamente com a agência governamental para reduzir os graves problemas de desperdício. Também sugerimos que a política IR4.0 seja fortalecida e forneça orientações claras para cumprir um padrão global de compartilhamento de dados. Também pedimos ao governo que incentive a indústria a impulsionar a adoção da tecnologia IR4.0 e forneça um incentivo para o sucesso da implementação da economia circular e beneficie a sociedade. A adoção de uma cadeia de suprimentos circular baseada em IR4.0 acelera o crescimento da economia digital.” (Fernando, 2022, p.19)

As cadeias de suprimentos precisam ser analisadas para uma proposta estratégica de integração das tecnologias que transforme a economia linear em economia circular de circuito fechado. As ações precisam ser facilitadoras em alterações de políticas públicas específicas, educação ambiental, infraestrutura adequada, formação profissional, conscientização, tecnologias inovadoras e valorização dos produtos, reduzindo os impactos ambientais negativos.

Estratégias de comunicação, educação ambiental, divulgação, facilitação, incentivo e operacionalização podem contribuir fortemente para a mudança comportamental da população na aplicação da economia circular para a sustentabilidade.

“As pesquisas da ONU afirmam que a transição do modelo de Economia Linear (EL) para Economia Circular (EC) depende de as pessoas criarem habilidades sobre a EC para promover o interesse da comunicação nas escolas e universidades para as gerações atuais e futuras com mudança de mentalidade para uso de materiais, desenvolvimento de produtos, processos, produção e consumo no formato de EC para realmente a sustentabilidade possa ser aplicada de forma eficaz e eficiente.” (Alcocer, 2021, p. 1)

É importante conseguir informação abrangente de educação ambiental com acesso de toda a sociedade e um planejamento para ações de melhoria de infraestrutura para cumprir todos os pilares da EC.

“Os impactos industriais no meio ambiente precisam ser minimizados para reduzir as mudanças climáticas, o que beneficiará os seres humanos. A Indústria 4.0, o novo paradigma produtivo, promete ganhos de produtividade para as empresas que conseguirem implementá-la, mas também é dependente de recursos naturais, impactando o meio ambiente. Identificar e analisar possíveis estratégias de produção mais limpa associadas à Indústria 4.0 para otimizar os sistemas de manufatura em projetos de implantação da Indústria 4.0, além de reduzir os impactos ambientais dessas empresas.” (Satyro, 2023, p. 1)

A integração das tecnologias nos pilares da EC com governos, empresas e sociedade são relevantes para a sustentabilidade das cadeias de suprimentos e cidades.

3.3 HIPÓTESES DA PESQUISA

A proposta de um modelo de Sistema de Gestão Ambiental (SGA) com base nos pilares da Economia Circular (EC) e aplicando tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) nas Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS) pode possibilitar oportunidades inovadoras para governo, empresas e sociedade na melhoria dos indicadores de sustentabilidade.

A hipótese provável é que a integração das tecnologias atuais da I4.0, aplicada em um SGA baseado nos pilares da EC, pode apresentar resultados positivos no futuro para otimizar

as organizações e a sociedade nas cadeias de suprimentos, visando a melhoria da sustentabilidade.

As oportunidades derivadas da aplicação das tecnologias nos pilares da EC no modelo de SGA podem resultar em projetos de automatização operacional nas CSS.

Essas derivações incluirão o desenvolvimento de softwares de declaração, aplicativos e outras tecnologias aplicadas aos pilares da EC como suporte à sustentabilidade das organizações.

Projetos de tecnologias aplicadas em SGA nos pilares da EC podem ser implementados pelas partes interessadas, como governo, empresas e sociedade.

Espera-se um resultado futuro positivo na melhoria da sustentabilidade com base nos pilares da EC, em função da aplicação do modelo de SGA e das tecnologias da I4.0 nas CSS.

3.4 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO MODELO SGA EC CSS E SOFTWARE

Para propor um modelo de SGA com tecnologias digitais em EC nas CSS e alcançar o objetivo da tese, foram empregadas pesquisas metodológicas com intervenção e pesquisa ação.

As etapas para delinear a arquitetura de um modelo e software de apoio ao SGA começaram com pesquisas bibliográficas e revisão sistemática das tecnologias aplicadas em monitoramento ambiental, economia circular e cadeias de suprimentos nas indústrias.

Nas etapas seguintes foi comparado o SGA atual com base na ISO 14001 (2015) com aplicações das tecnologias para EC e CSS para tomadas de ações intervencionistas para delinear o Modelo de SGA em EC nas CSS. A Tabela 3, demonstra as etapas e as ações para alcançar o objetivo da tese.

Tabela 3 - Etapas de ações Intervencionistas no Desenvolvimento do modelo

<i>Etapas</i>	<i>Etapas da Intervenção</i>	<i>Ações Intervencionistas no Desenvolvimento do Modelo</i>
1ª.	Revisão bibliográfica de casos aplicados de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em Monitoramento Ambiental (MA)	Identificou-se que o uso de tecnologias da I4.0 em MA é recente, com aplicação empírica concentrada em Sistemas de Gestão Ambiental (SGA), agronegócio e recursos hídricos, com destaque para IoT, sensores e bancos de dados voltados ao controle e monitoramento. Diante da possibilidade de o MA no agronegócio e recursos hídricos estar inserido em SGA, investigou-se o referencial da norma ISO 14001, revelando uma lacuna relacionada à integração com Economia Circular (EC) nas Cadeias de Suprimentos (CS) e práticas de sustentabilidade.

<i>Etapa</i>	<i>Etapas da Intervenção</i>	<i>Ações Intervencionistas no Desenvolvimento do Modelo</i>
2 ^a .	Revisão bibliográfica de casos aplicados de tecnologias I4.0 e Economia Circular em Cadeias de Suprimentos	Verificou-se que as tecnologias I4.0 aplicadas à EC nas CS também são recentes, com predominância de estudos empíricos voltados à reciclagem, sem caracterização formal de SGA com ações circulares. Com base nos estudos sobre cadeias sustentáveis, evidenciou-se a necessidade de mapeamento de aspectos e impactos ambientais para embasar ações circulares fundamentadas nos pilares conceituais da EC.
3 ^a .	Revisão conceitual dos temas SGA, EC e Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS)	Analisaram-se as possibilidades de mapeamento das CS como meio de gerenciar o SGA fundamentado em ações circulares. A abordagem permite identificar aspectos e impactos ambientais, criando critérios de severidade para classificação de impactos poluentes, possibilitando o planejamento de ações mitigadoras circulares.
4 ^a .	Definição do formato ideal para gerenciar o ciclo PDCA, VSM, SWOT, LR em um SGA com base em EC nas CSS.	Desenvolveu-se a proposta de um banco de dados para o levantamento e gerenciamento de aspectos e impactos ambientais, sua severidade e o plano de ações. O sistema é orientado por EC em CS, viabilizando a criação de uma estrutura simples para entrada, atualização e consulta de dados, com foco na mitigação de impactos ambientais e aplicação em empresas individualmente.
5 ^a .	Construção de tabela de severidade e matriz de ações circulares genéricas	A partir do estudo de impactos ambientais (positivos, neutros e negativos) e dos pilares da EC, foi concebido um software de apoio ao modelo. Criou-se um código Hashi para registro da concepção de um SGA fundamentado na EC em CSS, integrando um sistema de gerenciamento de ações voltado à melhoria da sustentabilidade.
6 ^a .	Validação do modelo com profissionais da área	Realizou-se a avaliação do software por profissionais em empresas, aplicando-o de forma isolada e sem interação entre CS, com bancos de dados individuais.
7 ^a .	Levantamento de demandas a partir da validação com profissionais	A etapa revelou a necessidade de futuras atualizações no software para uso individualizado por pequenas empresas ou adaptação corporativa em médias e grandes empresas, com ou sem certificações ISO ou ESG. As demandas identificadas foram: (1) maior compatibilidade com sistemas ERP corporativos para integração de dados das CS e ações circulares; (2) desenvolvimento de banco de dados inteligente com incorporação de IA para mitigação de impactos e troca colaborativa de informações; (3) inclusão de gráficos indicadores para monitoramento da redução da severidade dos impactos e emissões de carbono, como métrica de resultados sustentáveis.
8 ^a .	Expansão do modelo em escala por diferentes empresas	Constatou-se a necessidade de adaptações específicas do modelo conforme as particularidades de cada organização. As empresas, de acordo com seus segmentos e estratégias, podem apropriar-se da

<i>Etapa</i>	<i>Etapas da Intervenção</i>	<i>Ações Intervencionistas no Desenvolvimento do Modelo</i>
		concepção inicial e realizar customizações no uso do software de apoio ao SGA com ações circulares, promovendo mitigação de impactos e avanços na sustentabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

As etapas descrevem a proposta do desenvolvimento de um modelo de Sistema de Gestão Ambiental (SGA) baseado na Economia Circular (EC), integrado às Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS) e suportado por tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0). A investigação iniciou-se com revisões bibliográficas que identificaram a aplicação recente e empírica das tecnologias I4.0 no Monitoramento Ambiental (MA), sobretudo em contextos ligados ao SGA nas indústrias, agronegócio, recursos hídricos e sistemas informatizados de controle. A análise revelou uma lacuna na integração entre práticas de EC e os modelos tradicionais de SGA, particularmente no que tange à gestão de aspectos e impactos ambientais dentro das cadeias de suprimentos.

Posteriormente, a revisão de literatura sobre EC aplicada em CS evidenciou o predomínio de ações voltadas à reciclagem, sem estruturas formais de modelos circulares de gestão ambiental. Isso motivou a construção de um modelo conceitual fundamentado na identificação de impactos ambientais, critérios de severidade e planejamento de ações mitigadoras com base nos princípios da EC.

A construção do modelo envolveu o desenvolvimento de um banco de dados simples para entrada, atualização e consulta de informações ambientais, além da criação de uma tabela de severidade e matriz de ações circulares genéricas. Um software de apoio foi concebido e registrado por meio de código Hashi, sendo posteriormente validado por profissionais da área, que apontaram sua aplicabilidade em empresas individualizadas. A validação também indicou necessidades de aprimoramento, como integração com sistemas ERP, incorporação de inteligência artificial para ações automatizadas e colaborativas, além de gráficos de desempenho para mensurar a redução de impactos ambientais e emissões de carbono. Por fim, observou-se a viabilidade de expansão e adaptação do modelo por diferentes empresas, que, conforme seus contextos corporativos, podem personalizar a aplicação do software, favorecendo a mitigação de impactos e a promoção da sustentabilidade nas cadeias de suprimentos.

4 RESULTADOS DO MODELO DO SGA - EC – CSS - SOFTWARE DE APOIO

Os resultados da proposta do modelo de Sistema de Gestão Ambiental (SGA) em Economia Circular (EC), aplicado às Cadeias de Suprimentos (CS), bem como do software de apoio correspondente, serão apresentados em quatro seções distintas:

Na primeira seção (4.1), será exposta a proposta do modelo desenvolvido, fundamentada em referências teóricas e em estudos de caso que evidenciam a efetividade da aplicação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) em contextos de Economia Circular (EC) em Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS). Esta apresentação incluirá o uso de ferramentas de planejamento organizacional e tecnologias inovadoras, com o objetivo de promover a melhoria da sustentabilidade.

Na segunda seção (4.2), será apresentada a concepção de um software de apoio voltado ao SGA–EC–CSS. Este software será estruturado com base em uma abordagem declaratória que contempla a identificação de aspectos e impactos ambientais, a avaliação da severidade desses impactos e a proposição de ações circulares voltadas à mitigação de efeitos ambientais negativos.

Na terceira seção (4.3), serão discutidos os resultados obtidos com a aplicação do modelo proposto, à luz da literatura e de estudos de caso que abordam a integração entre o SGA e a EC para o avanço da sustentabilidade, destacando-se a importância da inovação por meio do uso de tecnologias.

Por fim, na quarta seção (4.4), serão apresentados os resultados de um estudo de caso com base em pesquisa aplicada, realizada em empresas por meio da aplicação de questionários. Este estudo tem como finalidade a validação experimental do modelo e do software de apoio, com ênfase no papel da tecnologia da informação no suporte ao SGA–EC–CSS, particularmente na identificação de aspectos e impactos ambientais e na proposição de ações circulares para mitigação de impactos negativos, visando a melhoria contínua da sustentabilidade.

4.1 MODELO SGA - EC - CSS

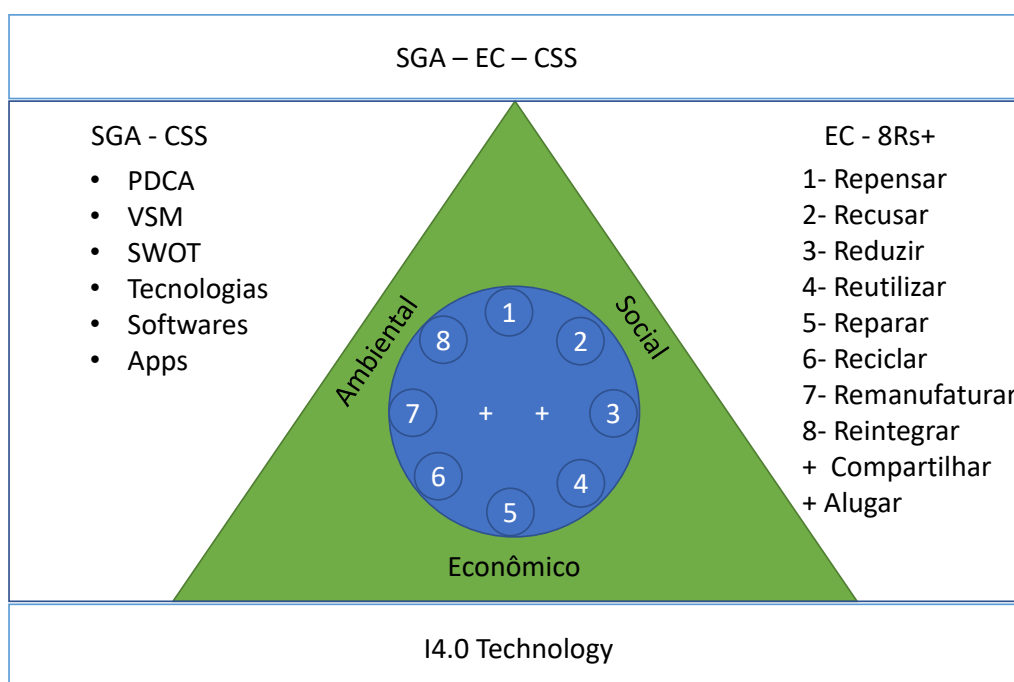
O modelo foi desenvolvido com base nos conceitos da pesquisa bibliográfica e da pesquisa aplicada do tema da tese, utilizando ferramentas do Sistema de Gestão Ambiental (SGA), tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0), pilares da Economia Circular (EC) e Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS).

A proposta do modelo de Sistema de Gestão Ambiental (SGA) considerou a possibilidade de integração das tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) nos pilares da Economia

Circular (EC) nas Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS), em uma sequência de operacionalização do sistema, modus operandi produtivo, aplicando em sua totalidade e em partes nas Cidades Sustentáveis, abrangendo clientes com produtos no fim de vida.

A Figura 12, representa a proposta de um modelo estruturado do planejamento operacional de atividades sustentáveis através do SGA, os pilares da EC nas etapas da CSS, e com a possibilidade do uso integrado das tecnologias da I4.0 para a melhoria contínua dos indicadores de sustentabilidade.

Figura 12 - Modelo Estrutural SGA – I4.0 - EC - CSS

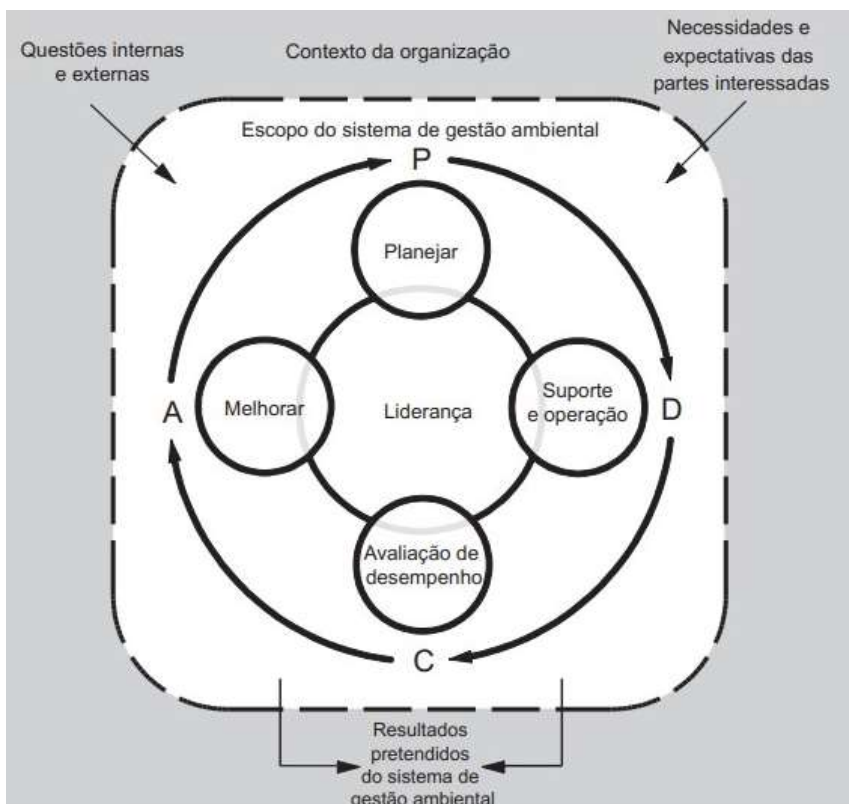


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O SGA para CSS tem base nos pilares da EC e nos 8Rs+ aplicados, utilizando ferramentas de planejamento organizacional como PDCA, VSM, SWOT e tecnologias da I4.0, além de softwares e aplicativos, aplicando o conceito de melhoria contínua da sustentabilidade. Com o suporte das tecnologias aplicadas nos pilares da EC, o SGA utiliza a ferramenta PDCA para a melhoria contínua dos indicadores ambientais.

A Figura 13, apresenta o ciclo de melhoria contínua aplicado no SGA como P = *Plan* / Planejar; D = *Do* / Executar; C = *Check* / Checar e A = *Action* / Ação.

Figura 13 - PDCA - Ciclo de Melhoria Contínua

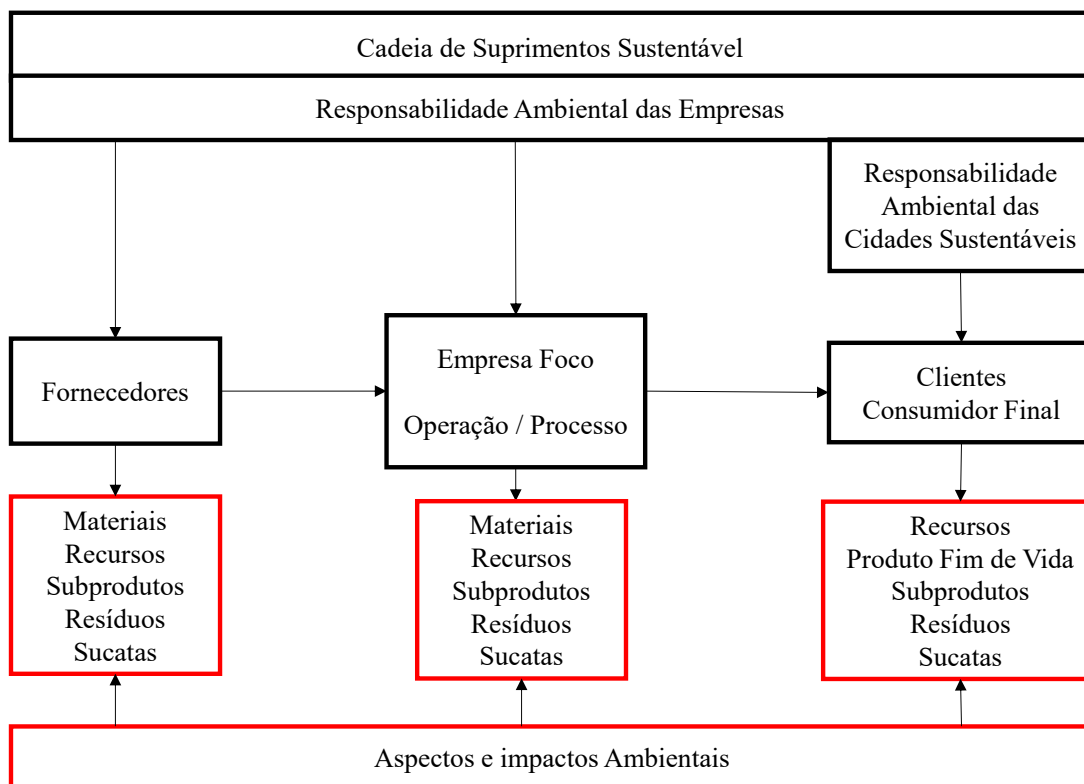


Fonte: – Modelo da ISO 14001 (2015)

O ciclo PDCA é utilizado para identificar problemas no Sistema de Gestão Ambiental (SGA) e suas etapas de liderança, planejamento, suporte e operação, avaliação de desempenho e melhoria, que geram impactos ao meio ambiente. O ciclo permite determinar as causas desses impactos, planejar ações corretivas, verificar a eficácia dessas ações e implementar soluções definitivas para eliminar os problemas no sistema operacional do SGA.

A Figura 14, demonstra a aplicação do modelo nas Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (CSS) e nas Cidades Sustentáveis, mapeando os resíduos, subprodutos e produtos ao final de sua vida útil.

Figura 14 - Responsabilidade Ambiental das Empresas e Cidades nas CSS



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Nas CSS, as atividades envolvem a entrada de recursos dos fornecedores, o processamento pela empresa e a saída de produtos. Na entrada, estão os materiais e recursos; no processo, as operações; e na saída, os produtos. Em toda a cadeia, os resíduos e subprodutos são geridos com responsabilidade ambiental por parte das empresas e partes interessadas.

Após a saída de produtos e serviços, os clientes enfrentam a gestão de produtos/serviços ao fim de sua vida útil, subprodutos e resíduos, com responsabilidade ambiental compartilhada entre Empresas e Cidades.

Na sequência, para delinear a operação utilizou ferramentas de planejamento organizacional no modelo de Sistema de Gestão Ambiental (SGA) com base nos pilares da Economia Circular (EC), integrado às tecnologias digitais para a entrada de recursos, processos produtivos e saída de produtos, denominada de CSS básica, além da gestão dos produtos e serviços nos consumidores finais, aplicando o conceito de Cidades Sustentáveis.

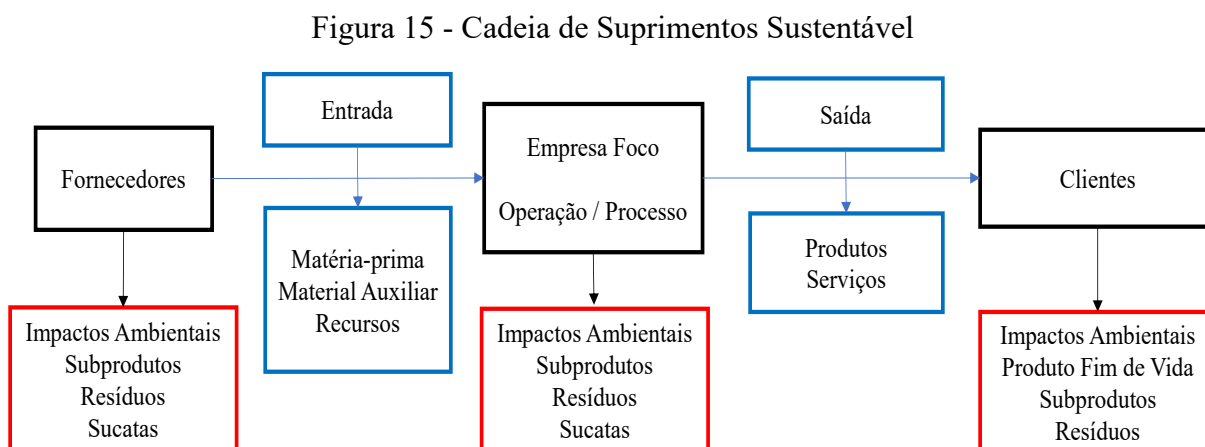
Para o desenvolvimento e proposta do modelo de SGA, uma das ferramentas estratégicas é o mapeamento da CSS com base nos pilares da EC e a integração das tecnologias emergentes, considerando as entradas de recursos materiais, energias, processos, produtos, serviços, subprodutos e resíduos.

Nas Cidades Sustentáveis, são aplicadas ferramentas de planejamento de atividades operacionais de logística reversa para a destinação de produtos ao fim de sua vida útil e resíduos.

O uso dessas tecnologias digitais tem o objetivo de inovar os pilares da EC para melhorar os resultados das CSS e Cidades Sustentáveis, com o suporte do SGA para a melhoria contínua da sustentabilidade.

Uma cadeia de suprimentos básica é definida por fornecedor, empresa, foco e cliente, resumindo a operacionalização da empresa, podendo ser planejada o SGA em seus procedimentos organizacionais para melhorar a sustentabilidade, aplicando os conceitos de EC.

A Figura 15, demonstra uma cadeia de suprimentos básica de entrada de recursos, operação/processo, subprodutos/resíduos, saída de produtos/serviços e os produtos ao fim de sua vida útil.



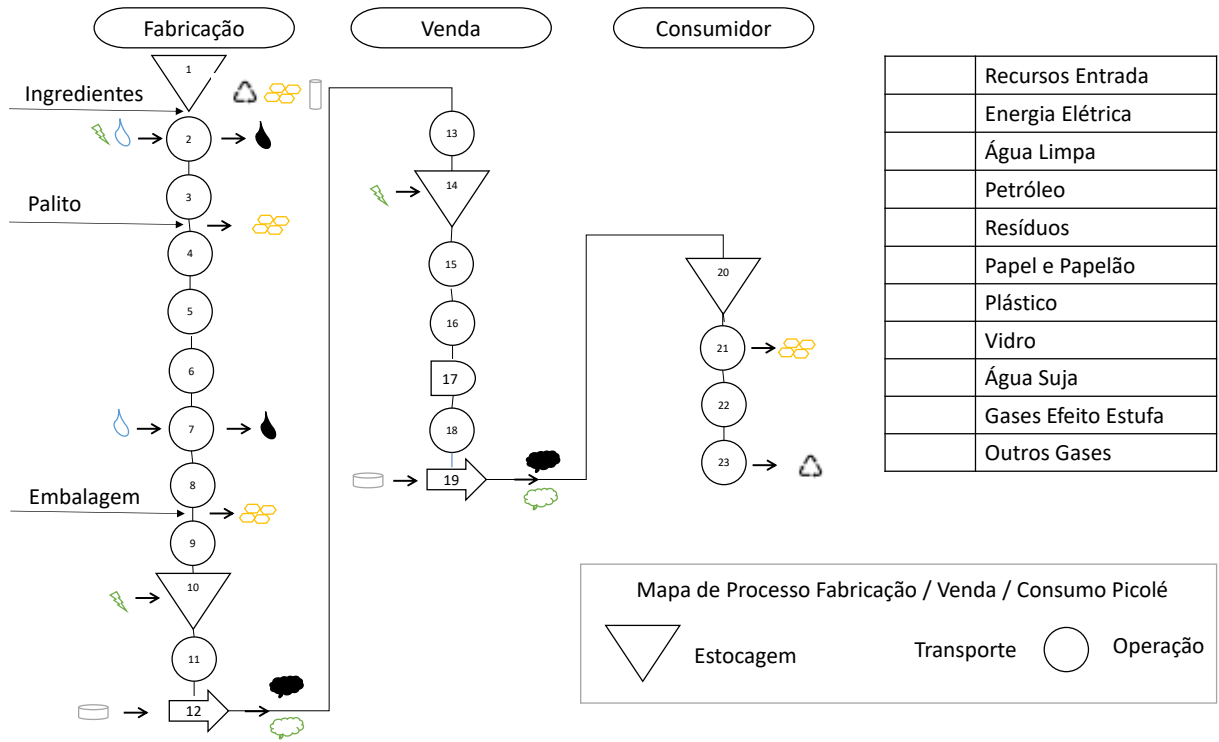
Fonte: Elaborada pelo Autor (2023)

O mapeamento de uma cadeia de suprimentos, denominado de *Value Stream Mapping (VSM)*, contribui significativamente para uma análise ambiental e econômica, pois indica os valores monetários positivos e negativos de todos os processos, incluindo os aspectos e impactos ambientais.

Para auxiliar o procedimento declaratório de entrada de recursos e saída de resíduos, subprodutos e produtos no fim de sua vida útil, pode-se usar um fluxograma de cada segmento de produto/serviço. Este fluxograma permite um mapeamento mais detalhado para a melhoria contínua do SGA.

A Figura 16, demonstra um modelo básico extraído da literatura de Mapeamento da Cadeia de Valor, denominado de VSM.

Figura 16 - VSM Fluxograma Fabricação e Consumo

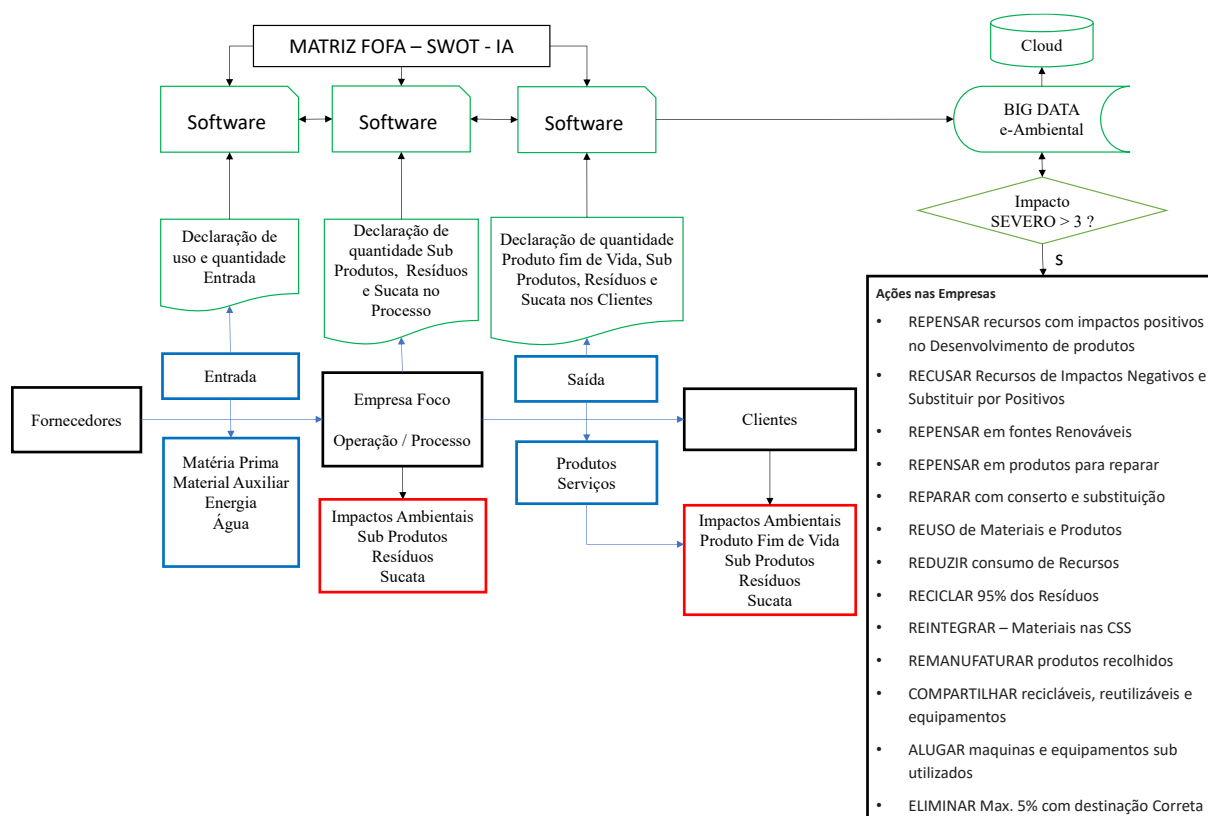


Fonte: (Braga, 2021 p. 72)

As empresas de transformação, manufatura, construção, comercialização, prestação de serviços e outras diversas classificações devem declarar e atualizar periodicamente a Cadeia de Suprimentos Sustentável (CSS) básica com informações para monitorar a evolução da sustentabilidade das empresas, suas ações e sua classificação, utilizando um software e banco de dados para planejamento ambiental e planos de ações baseados em EC.

A Figura 17, representa um Fluxo Declaratório de uma cadeia de suprimentos para suporte ao Sistema de Gestão Ambiental (SGA) nas Cidades Sustentáveis (CSS), com foco em melhoria contínua para a sustentabilidade.

Figura 17 - Fluxo Declaratório do SGA nas CSS



Fonte: Elaborada pelo Autor (2023)

A declaração I na etapa de entrada dos fornecedores, integrada a um banco de dados *Big Data* e *Cloud*, é declaratória dos recursos de entrada, tipo de recurso, fonte, quantidade, classificação e resultado.

A declaração II na etapa do processo operacional da Empresa Foco é declaratória dos resíduos e subprodutos gerados no processo operacional da cadeia de suprimentos, indicando tipo de recurso, fonte, quantidade, classificação e resultado.

A declaração III na etapa de saída de produtos e serviços para o cliente é declaratória dos produtos fim de vida e resíduos gerados no cliente final da cadeia de suprimentos, indicando tipo de produto fim de vida, quantidade, vida útil do produto, possibilidade de reparo, desmontagem, destino, classificação e resultado.

Para as declarações em cada etapa da CSS dos tipos de recursos, resíduos, subprodutos e produtos fim de vida, é definido o critério de severidade dos aspectos e impactos ambientais.

Segundo a *International Organization for Standardization - ISO 14001* (2015), aspecto ambiental: elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que interage ou

pode interagir com o ambiente e os impactos ambientais são quaisquer modificações do meio ambiente, positiva ou negativa, resultante ou não dos aspectos ambientais da organização.

Para ações nas severidades dos impactos ambientais, as empresas poderão escolher seus recursos de entrada, seus processos operacionais e recursos para minimizar resíduos/subprodutos e definir os formatos dos produtos/serviços aos clientes com análise dos aspectos e impactos ambientais que esses materiais vão trazer durante o processo operacional e ao final da vida útil.

As ações inovadoras são para a melhoria dos resultados da EC, mitigando o impacto negativo com aplicação das tecnologias da I4.0.

A empresa pode utilizar uma Matriz FOFA, denominada Pontos Fortes / Oportunidades e Pontos Fracos / Ameaças, para propor ações inovadoras utilizando as tecnologias da I4.0.

A Matriz FOFA, denominada também *SWOT*, Tabela 4, indica os pontos fortes (*Strengths*) e oportunidades (*Opportunities*) que podem ser exploradas, e pontos fracos (*Weaknesses*) e ameaças (*Threats*) que podem ser transformados com ações em pontos fortes e oportunidades de melhorias para a sustentabilidade com aplicação das tecnologias da I4.0 nos pilares da EC.

Tabela 4 - Matriz FOFA / SWOT para Pilares de EC

Pontos Fortes - (<i>Strengths</i>) – Ações Circulares	Pontos Fracos - (<i>Weaknesses</i>) – Impacto Ambiental
1 - Reparo e manutenção de Produto para reuso 2- Reciclagem de Produto Alto Valor fim de vida 3 – Redução de consumo de recursos e redução de custos 4- Produtos que possam ter reparos, compartilhados, reutilizados e reciclados 5- Embalagens mínimas, reusáveis e recicláveis 6- Energias renováveis geram redução de custos e retorna o investimento, preservam os recursos e têm menores impactos ao meio ambiente 7- Os materiais entram em ciclos nas cadeias, reduzem lixo e contaminação do meio ambiente 8-O controle e monitoramento do processo reduzem custo e melhora o fator econômico eliminando desperdícios e contaminação 9- Prevenção de contaminações e desastres ambientais 10- Fornecedores consegue melhoria na sustentabilidade (ambiental, econômica e ambiental) utilizando como marketing verde real	1- Produtos descartáveis 2- Produto fim de vida se torna sucata com contaminação 3- Produtos lacrados que não permite reparo 4- Produtos de materiais não recicláveis 5 - Embalagem do produto 6- Energias Não Renováveis e poluidoras 7 - Materiais que colocam a saúde humana em riscos de forma direta ou indireta 8- Processos sem definição que tem desperdício de eficiência e produtividade 9- Processos que contaminam o ambiente 10- Fornecedores que não seguem sistema de gestão ambiental

Oportunidades - (<i>Opportunities</i>) – <i>Ações Circulares</i>	Ameaças - (<i>Threats</i>) – <i>Impacto Ambiental</i>
1 - Rastrear produtos nos clientes com RFID e sensores inteligentes para avisar para realizar reparos e manutenção as vezes on-line. 2- Rastrear produtos nos clientes com RFID para reciclagem de produto que tem valor de uso de material reciclado gerando fidelização de nova aquisição. 3- No desenvolvimento do produto permitir que partes do produto possam ter reparos 4- No desenvolvimento do produto optar por materiais reciclados 4- Oferecer nos pontos de vendas sistema de coletas e aviso de devolução do produto para reciclagem ou destinação correta 4- Utilizar sistema de avisos de cargas de materiais para reciclagem ou destinação correta com sensores ou códigos QR / RFID 5 – Reduzir o uso de recursos materiais, hídricos e energéticos, utilidade de locomoção com menor emissão poluente e compartilhamento do uso de produtos e serviços. 6- Recusar energias não renováveis e repensar em energias renováveis, materiais não recicláveis e repensar em embalagens que possam ser recusadas e ou de materiais recicláveis 7-Recusar Materiais contaminantes e substituir por materiais biodegradáveis e não contaminantes 8- Utilização de tecnologias da I4.0 para controle e monitoramento dos processos que impactam o meio ambiente 9- Repensar em trocar por processos não contaminantes. 9- Utiliza de tecnologias da I4.0 para realizar tratamentos e monitorar a não contaminação, rastrear e monitorar para não ter contaminação 9- Utilizar de sistemas de contenção e incineração com controle e rastreio de contaminação 10 - Recusar fornecedores sem ações de melhoria no Sistema de gestão ambiental em declaratória de impactos na cadeia de suprimentos.	1-Produto com baixa durabilidade em tempo 2-Produto vai para lixo e contaminações 3-Dificuldade de consertar 4-Materiais de baixo valor que não tem reciclagem 5-Aumento de Lixo sem reciclar 6-Escassez de recursos fósseis e poluição de ar, solo e águas 7-Materiais e Produtos contaminantes de ar, Solo e Água 8-Desperdício de recursos por falta de controle e otimização de Processo 9-Processos produtivos com operações contaminantes 10-Fornecedores não sustentáveis

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

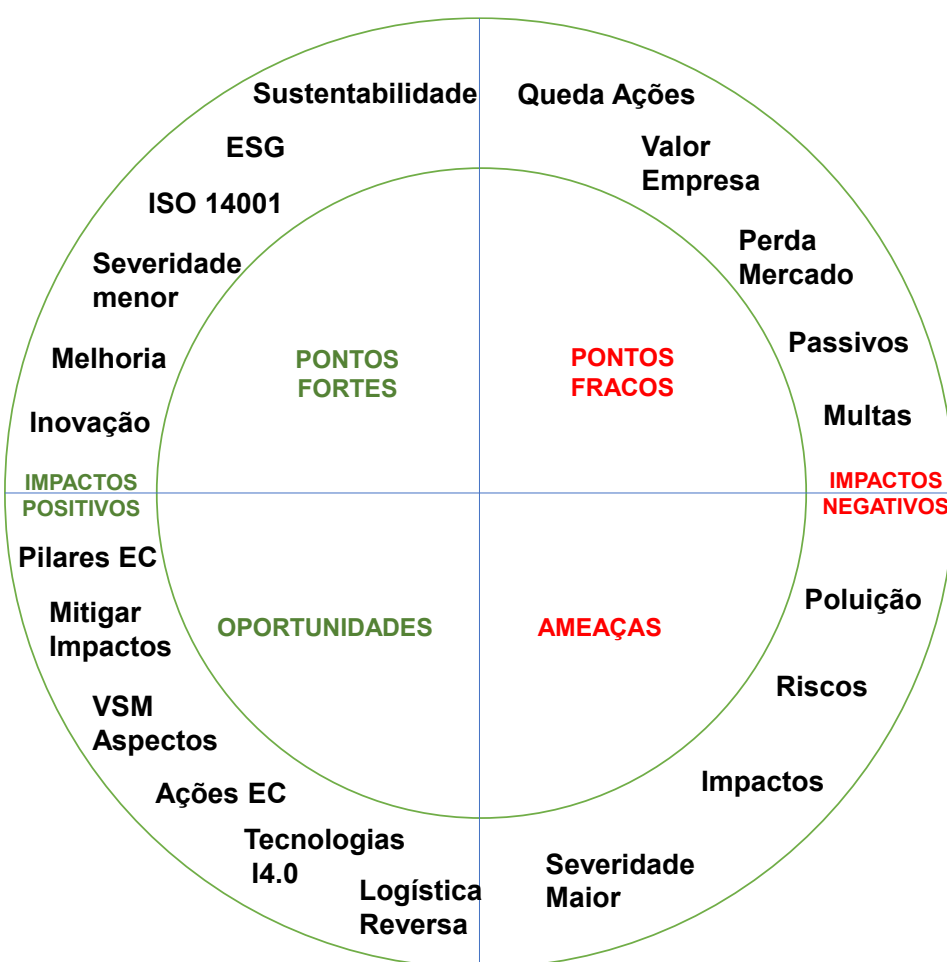
A matriz FOFA, neste contexto, descreve de forma genérica as ações estratégicas para alcançar objetivos nos pilares da EC, aplicando tecnologias da I4.0 em uma CSS. Essas tecnologias são aplicadas em todas as etapas, desde a entrada de recursos, processamento e

saída de produtos e serviços, até a gestão de recursos, resíduos e produtos fora de uso nas Cidades Sustentáveis.

As ações sobre impactos e severidades visam transformar os pontos fracos e ameaças em pontos fortes e oportunidades, conforme indicado na matriz FOFA/SWOT, que se baseia nos pilares da EC e da I4.0.

O modelo apresentado na Figura 18, pode organizar o ciclo de melhoria contínua, identificando pontos fracos e ameaças, e planejando ações inovadoras da FOFA/SWOT para mitigar impactos negativos nas etapas da CSS.

Figura 18 - Modelo Ação Melhoria e FOFA/SWOT



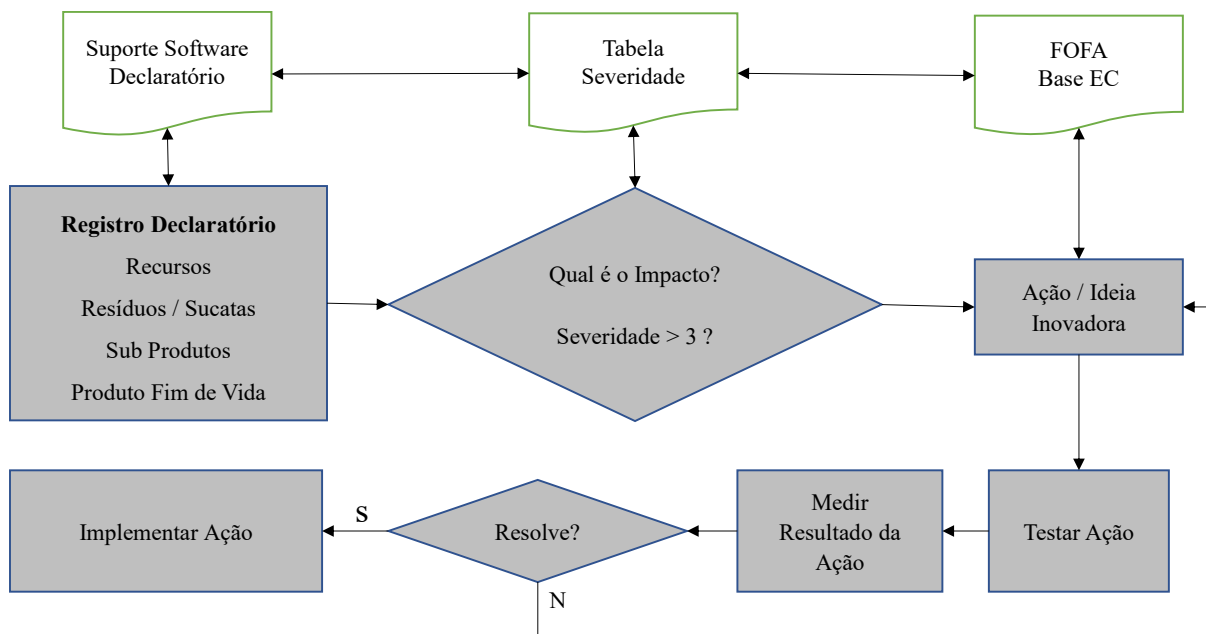
Fonte: Elaborado pelo Autor

O modelo de ação de melhoria propõe, para a sustentabilidade, aplicar as oportunidades para eliminar as ameaças e pontos fracos, mitigando os impactos negativos e alcançando as metas dos pontos fortes, obtendo impactos positivos.

Para a validação da reclassificação da severidade após ações, com base nos pilares da EC, pode ser utilizada uma metodologia de análise de validação das ações.

A Figura 19, apresenta uma metodologia para solução de problemas de sustentabilidade, descrita de forma genérica na matriz FOFA.

Figura 19 - Metodologia de Solução de Problemas



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no plano de ação, é identificado o problema, propõe-se testar e medir o resultado e a resolução do impacto ambiental. Se sim, implementa-se a ação. Caso contrário, é necessário encontrar outra ideia para eliminar o problema, aspecto e impacto ambiental.

O modelo de SGA proposto tem suporte de tecnologias da I4.0 integradas aos pilares da EC. O sistema abaixo pode ser derivado em várias aplicações para planejamento e desenvolvimento aplicados no SGA nas CSS e Cidades Sustentáveis.

Outras tecnologias digitais emergentes podem ser incorporadas aos modelos de SGA utilizando CPS e IoT, realidade aumentada, rede de sensores, IA, ML, MA, blockchain, RFID, robôs, entre outras.

4.2 SOFTWARE SUPORTE DECLARATÓRIO DO SGA NAS CSS

Para utilizar o suporte do software declaratório, as empresas devem mapear as CSS específicas e realizar o Mapeamento da Cadeia de Valor (VSM), que fornecem as informações necessárias para o registro declaratório, a matriz FOFA/SWOT e o conceito de PDCA para melhoria contínua.

O software de suporte declaratório é utilizado em CSS específicas pelas empresas para registrar, em um banco de dados, as etapas e os tipos de recursos, resíduos, subprodutos e

produtos de fim de vida nas etapas de fornecedor, empresa foco e cliente. A Figura 20, representa os campos de registros do software:

Figura 20 - Campos de Registro do Software

BANCO DE DADOS AAIA - SOFTWARE DE ANÁLISE DOS ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS EM ECONOMIA CIRCULAR														
ETAPA CS	Atividade Serviço	TIPO de Recurso	DESCRIÇÃO do Recurso	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Classificação do Impacto	Severidade I do Impacto	Ação da Economia Circular	Descrição da Ação Circular	Quem (Responsável / Setor)	Quando data (xx/xx/xxxx)	Retorno	Re Classificação	Severidade F do Impacto
Entrada	LINHA A	Energia	Energia hidrelétrica	Consumo de Energia	Represas Inundações	Neutralizado	6	Repensar	Alteração da matriz energética 50% para energia renovável solar	Diretoria, Facilite	31/12/2026	Ambiental, Social e Econômico	Positivo	1
Entrada	tratamento térmico	Energia	Carvão	Emissões Atmosféricas	Destruição Camada Ozônio	Negativo	10	Recusar	Transformar em Energia renovável	Diretoria, Facilite	30/12/2025	Ambiental, Social e Econômico	Positivo	1

Fonte: elaborado pelo Autor (2024)

Em função dos registros dos recursos, resíduos, subprodutos e produtos de fim de vida, são definidos os aspectos, os impactos, a classificação e a severidade ambiental de acordo com a tabela de critérios de severidade (1-10), conforme o modelo de registro da Figura 21:

Figura 21 - Registro da CSS Especifica e tabela de Severidade

ETAPA CS	Atividade Serviço	TIPO de Recurso	DESCRIÇÃO do Recurso	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Classificação do Impacto	Severidade I do Impacto
Entrada	LINHA A	Energia	Energia hidrelétrica	Consumo de Energia	Represas Inundações	Neutralizado	6
Entrada	tratamento térmico	Energia	Carvão	Emissões Atmosféricas	Destruição Camada Ozônio	Negativo	10

Fonte: elaborado pelo Autor (2024)

Após registrar e definir a severidade para cada declaração nas etapas da CSS, a Figura 22, apresenta o registro da descrição das ações de acordo com os pilares da EC e a matriz FOFA/SWOT:

Figura 22 - Registro das Ações

Ação da Economia Circular	Descrição da Ação Circular	Quem (Responsável / Setor)	Quando data (xx/xx/xxxx)	Retorno	Re Classificação	Severidade F do Impacto
Repensar	Alteração da matriz energética 50% para energia renovável solar	Diretoria, Facilite	31/12/2026	Ambiental, Social e Econômico	Positivo	1
Recusar	Transformar em Energia renovável	Diretoria, Facilite	30/12/2025	Ambiental, Social e Econômico	Positivo	1

Fonte: elaborado pelo Autor (2024)

Ao registrar as ações com base nos pilares da EC e com o apoio da Matriz FOFA/SWOT, define-se o plano de ação com responsabilidade (quem), prazo (quando), retorno relativo à sustentabilidade (ambiental, social e econômico) e a reclassificação da severidade (Tabela 3) após as ações.

O critério de severidade é definido de acordo com a declaração do uso de recursos, resíduos, subprodutos e produtos de fim de vida, tem classificação conforme critérios de

impacto positivo, neutro e negativo, se o impacto é direto ou indireto, reversível ou irreversível, local ou regional, de efeito imediato, a médio prazo, temporário ou permanente, e impacto estratégico coletivo.

De acordo com a análise do impacto no meio ambiente pelo uso de recursos, resíduos, subprodutos e produtos de fim de vida, realiza-se a classificação de maior ou menor severidade de acordo com os critérios de severidade da Tabela 5:

Tabela 5 - Tipos de Impactos e Critério de Severidade

Tipos de Impactos	Severidade
Impacto Positivo: quando a ação resulta na melhoria da qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Direto: quando resulta de uma simples relação de causa e efeito; Global: quando a ação afeta o próprio sítio, suas imediações, região, afeta país, mundo global. Impacto estratégico: quando um componente ou recurso ambiental de importância coletiva ou nacional ou global é afetado; Imediato: quando o efeito surge no instante em que se realiza a ação; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é MENOR do o Seuquestro de CO ₂ . Ações: Ecológica, Engenharia e Circular. Resultado: Social, Saúde, Ambiental e Economico.	1
Impacto Positivo: quando a ação resulta na melhoria da qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Direto: quando resulta de uma simples relação de causa e efeito; Regional: quando a ação afeta apenas o próprio sítio e suas imediações; Médio Prazo: quando o efeito surge no instante em que se realiza a ação; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é MENOR do o Seuquestro de CO ₂ . Ações: Ecológica, Engenharia e Circular. Resultado: Social, Saúde, Ambiental e Economico.	2
Impacto Positivo: quando a ação resulta na melhoria da qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Indireto: quando é uma reação secundária em relação à ação ou quando é parte de uma cadeia de reações; Local: quando o efeito se propaga por uma área e suas imediações; A longo prazo: quando o efeito se manifesta depois certo tempo após a ação; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é MENOR do o Seuquestro de CO ₂ . Ações: Ecológica, Engenharia e Circular. Resultado: Social, Saúde, Ambiental e Economico.	3
Impacto Neutralizado: quando a ação resulta em estabilidade à qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Direto: quando resulta de uma simples relação de causa e efeito; Reversível; Local: quando a ação afeta apenas o próprio sítio e suas imediações; Imediato: quando o efeito surge no instante em que se realiza a ação; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é IGUAL o Seuquestro de CO ₂ . Ações: Somente Regulamentares. Resultado: Não gerar Passivo Ambiental	4
Impacto Neutralizado: quando a ação resulta em estabilidade à qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Indireto: quando é uma reação secundária em relação à ação ou quando é parte de uma cadeia de reações; Reversível; Regional: quando o efeito se propaga por uma área e suas imediações; Impacto estratégico: quando um componente ou recurso ambiental de importância coletiva ou nacional é afetado; A médio e longo prazo: quando o efeito se manifesta depois certo tempo após a ação; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é IGUAL Seuquestro de CO ₂ . Ações: Somente Regulamentares. Resultado: Não gerar Passivo Ambiental	5
Impacto Neutralizado: quando a ação resulta em estabilidade à qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Indireto: quando é uma reação secundária em relação à ação ou quando é parte de uma cadeia de reações; Irreversível; Regional: quando o efeito se propaga por uma área e suas imediações; Impacto médio: quando um componente ou recurso ambiental de importância coletiva ou nacional é afetado mas sem efeitos degradativos; Temporário: quando o efeito permanece por um tempo determinado; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é IGUAL Seuquestro de CO ₂ . Ações: Somente Regulamentares. Resultado: Não gerar Passivo Ambiental	6
Impacto Negativo: quando a ação resulta em danos à qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Direto: quando resulta de uma simples relação de causa e efeito; Reversível; Local: quando a ação afeta apenas o próprio sítio e suas imediações; Imediato: quando o efeito surge no instante em que se realiza a ação; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é MAIOR do o Seuquestro de CO ₂ . Ações: Minimalistas. Resultado: Somente Lucro economico	7
Impacto Negativo: quando a ação resulta em danos à qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Direto: quando resulta de uma simples relação de causa e efeito; Reversível; Local: quando a ação afeta apenas o próprio sítio e suas imediações; A médio e longo prazo: quando o efeito se manifesta depois certo tempo após a ação; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é MAIOR do o Seuquestro de CO ₂ . Ações: Minimalistas. Resultado: Somente Lucro economico	8
Impacto Negativo: quando a ação resulta em danos à qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Indireto: quando é uma reação secundária em relação à ação ou quando é parte de uma cadeia de reações; Irreversível; Regional: quando o efeito se propaga por uma área e suas imediações; Impacto Forte: quando um componente ou recurso ambiental de importância coletiva ou nacional é afetado; Temporário: quando o efeito permanece por um tempo determinado; Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é MAIOR do o Seuquestro de CO ₂ . Ações: Minimalistas. Resultado: Somente Lucro Economico	9
Impacto Negativo: quando a ação resulta em danos à qualidade de um fator ou parâmetro ambiental; Indireto: quando é uma reação secundária em relação à ação ou quando é parte de uma cadeia de reações; Irreversível; Global: quando a ação afeta o próprio sítio, suas imediações, região, afeta país, mundo global.; Impacto Forte quando um componente ou recurso ambiental de importância coletiva ou nacional é afetado; Permanente quando os efeitos não param de se manifestar, em um horizonte temporal conhecido. Clima: Emissão da Demanda de CO ₂ é MAIOR do o Seuquestro de CO ₂ . Ações: Minimalistas. Resultado: Somente Lucro economico	10

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.3 RESULTADOS DO MODELO DE SGA – EC - CSS

É evidente que as empresas consomem muitos recursos energéticos, água e insumos materiais na produção em grande escala de produtos para o consumo humano, gerando poluição, mudanças climáticas e degradação ambiental devido ao não cumprimento dos pilares da economia circular.

Além disso, as cidades convivem com uma grande quantidade de lixo gerado pelo consumo de produtos e serviços por parte dos clientes. A população consome recursos naturais, polui com emissões de transporte e descarte de embalagens e produtos em fim de vida.

A quantidade de lixo, o consumo de recursos e materiais aumentam de forma descontrolada a cada dia, devido ao aumento da população, gerando poluição de grande impacto e contaminando várias áreas do planeta.

Sabe-se também que a média de reciclagem nas cidades brasileiras, segundo a Agência Brasil, é de apenas 4% de todo o lixo gerado Granda (2022). Essa baixa porcentagem é causada pela falta de infraestrutura operacional das atividades de logística reversa e pela ainda insuficiente educação ambiental.

Essas quatro afirmações básicas traduzem a preocupação com a sustentabilidade e a necessidade de ação por parte das empresas, dos governos e da sociedade em relação às situações descritas.

Na primeira parte da discussão dessas afirmações, é necessário aplicar tecnologias da I4.0 em pilares da EC em segmentos específicos das CSS e CIS, juntamente com leis governamentais para aplicação de modelos.

A preocupação com a escassez de recursos, a pressão mundial sobre as mudanças climáticas e as metas da Agenda 2030 para a sustentabilidade levaram a comissão de Meio Ambiente e o MMA a enviar e o Senado e Câmara Federal a aprovar o Projeto de Lei N° 1874, de 2022, que institui a Política Nacional de Economia Circular.

Para a governança empresarial da sustentabilidade, o monitoramento e controle ambiental das CSS nas empresas e nas cidades sustentáveis é essencial para a aplicação de SGA com base nos pilares da EC, utilizando as tecnologias digitais da 4ª. revolução industrial.

No desenvolvimento de produtos, é necessário selecionar materiais adequados que cumpram o ciclo fechado de produção, minimizar resíduos e consumo de recursos, considerar a possibilidade de reparos, reúso de produtos e materiais em fim de vida.

O modelo proposto de SGA-EC-I4.0 para as partes interessadas, empresas e governo, tem a função de declarar os recursos de entrada, processo, saída e planejamento de ações para

solução de problemas de impactos ambientais com base nos pilares da EC, criando inovações desde a criação do produto até a seleção de recursos, materiais e produtos em fim de vida.

A aplicação das tecnologias nas empresas e cidades oferece oportunidades de uso e otimização futura, facilitando do início ao fim da CSS para empresas que adotam a filosofia de desperdício zero, maior produtividade empresarial com responsabilidade ambiental e social.

De acordo com artigos, as aplicações envolvem oportunidades de inovações estudadas de forma específica, barreiras para o uso das tecnologias, envolvimento das partes interessadas e uma perspectiva futura para integração.

Esse modelo é uma proposta colaborativa para a sustentabilidade das organizações e necessita ser legislado entre governos e empresas para promover a sustentabilidade.

O monitoramento e controle ambiental das CSS também podem ser um método para discussão em comitê de melhorias da norma ISO 14001 para certificações, cujo objetivo é a melhoria contínua da mitigação de impactos ambientais e preservação do meio ambiente.

Esse modelo colabora com procedimentos sistêmicos para a implementação de um sistema de gestão ambiental utilizando tecnologias da I4.0 em CSS e cidades sustentáveis com base nos pilares da EC.

Para a governança da sustentabilidade na sociedade consumidora, o monitoramento e controle ambiental nas cidades sustentáveis, onde se encontra a população, é importante que haja uma ação conjunta de governo, empresa e sociedade para cumprir o SGA com base nos pilares da EC, com possível aplicação das tecnologias da I4.0.

É possível afirmar, com base na pesquisa realizada, que empresas, governos e sociedade no mundo devem impulsionar o uso integrado de tecnologias digitais da I4.0 para aplicar nos SGA com base nos pilares da EC para a sustentabilidade.

Algumas citações consideradas importantes na pesquisa demonstram as tendências do uso das tecnologias da I4.0 para um futuro promissor desse tema pesquisado.

Um primeiro passo para a EC é tentar ao máximo reduzir o consumo; se não for possível minimizar, reciclar e reusar produtos, reusar materiais e operacionalizar muito bem os aterros sanitários.

Este modelo propõe ações preventivas e corretivas em toda a cadeia de suprimentos, desde o fornecedor de recursos, o processo produtivo, a saída de produtos e a integração com governo e sociedade para produtos em fim de vida, resíduos orgânicos e inorgânicos nas CIS.

Esse modelo propõe criações inovadoras de softwares e aplicativos para dar suporte aos SGA das CSS e CIS, utilizando de forma derivada e integrada as tecnologias da I4.0 com base nos pilares da EC.

4.4 RESULTADOS DO TESTE E VALIDAÇÃO DO SOFTWARE DE APOIO

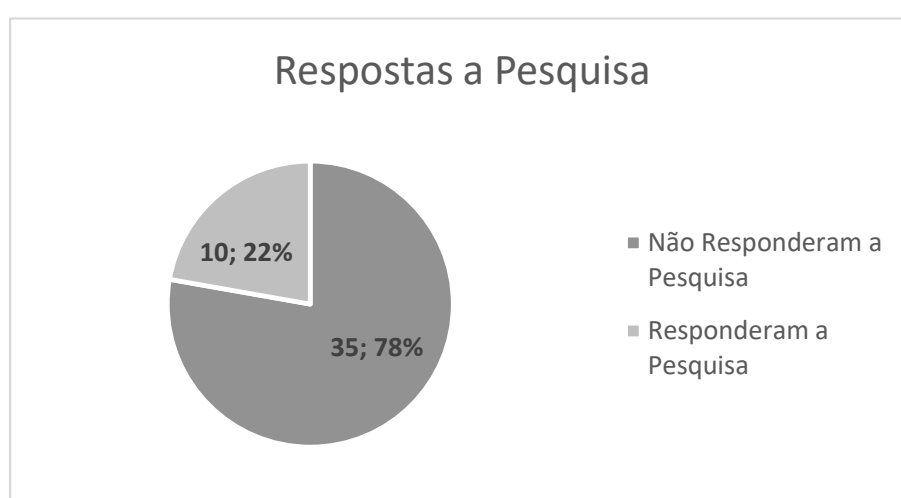
A pesquisa foi enviada a 35 profissionais de empresas com experiência descrita no cargo descritivo do LinkedIn. Os profissionais foram selecionados através desta rede social com a busca das palavras-chave "SGI", "ESG", "14001" ou "Ambiental".

Uma mensagem foi enviada via LinkedIn pedindo colaboração na análise, validação e teste de um software de gestão de aspectos e impactos ambientais, baseado em ações circulares nas cadeias de suprimentos para um projeto de pesquisa de doutorado.

Após o retorno do interesse, uma apresentação do conceito de sustentabilidade, economia circular, cadeia de suprimentos, operação e modelo do software, bem como suas instruções, foi enviada para resposta à entrevista via perguntas abertas de um questionário de aplicação, validação e teste.

A pesquisa foi aplicada a 10 profissionais de diferentes empresas que demonstraram interesse e tinham conhecimento e experiência na área de gestão ambiental e em suas respectivas cadeias de suprimentos. O Gráfico 9, demonstra os resultados da participação na pesquisa.

Gráfico 9 - % de Respostas da Pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Todos os profissionais que responderam ao questionário possuem formação superior, experiência comprovada em cadeias de suprimentos, e 80% deles possuem ao menos uma especialização, conforme a Tabela 6:

Tabela 6 - Formação Superior e Especialização dos Profissionais Entrevistados

<i>Formação Superior e Especialização</i>	<i>Quantidades</i>
Superior Engenharias	6
Superior Tecnologias	1
Superior Administração	1
Pós-gestão da Qualidade	4
Pós-gestão de processo	1
Pós-gestão de Projetos	2
Pós SGI / Auditor	3
Pós-gestão de Cadeias de Suprimentos	3
Pós-gestão Empresarial	2

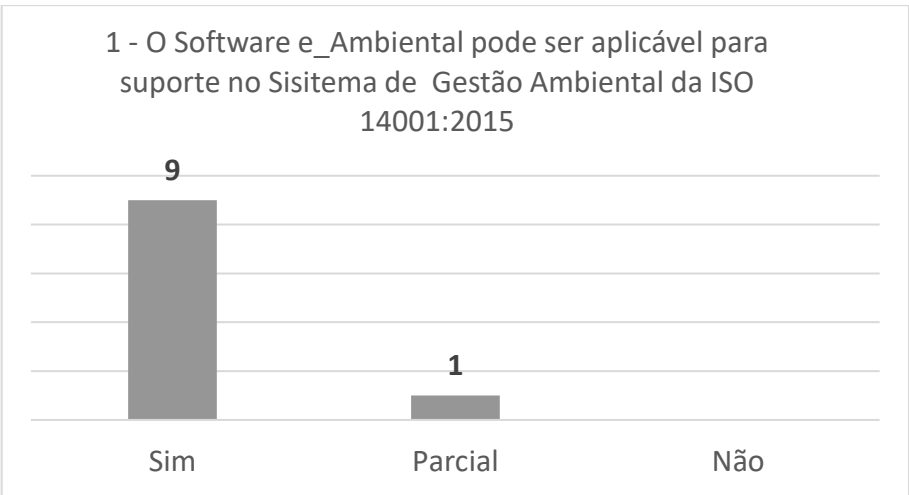
Fonte: elaborado pelo autor 2025

Os profissionais com formação superior e especialização correlacionadas à pesquisa viram a apresentação conceitual e as instruções do software. Seis deles testaram a simulação do software e responderam à entrevista; três outros apenas responderam à entrevista, e um respondeu à entrevista como se fosse perguntas fechadas, com “sim” e “não”.

Foi possível analisar de forma descritiva as respostas das questões, transformando as entrevistas em dados de resposta fechada para análise gráfica.

O Gráfico 10, demonstra as respostas da questão 1:

Gráfico 10 – Resultado da Entrevista da Questão 1

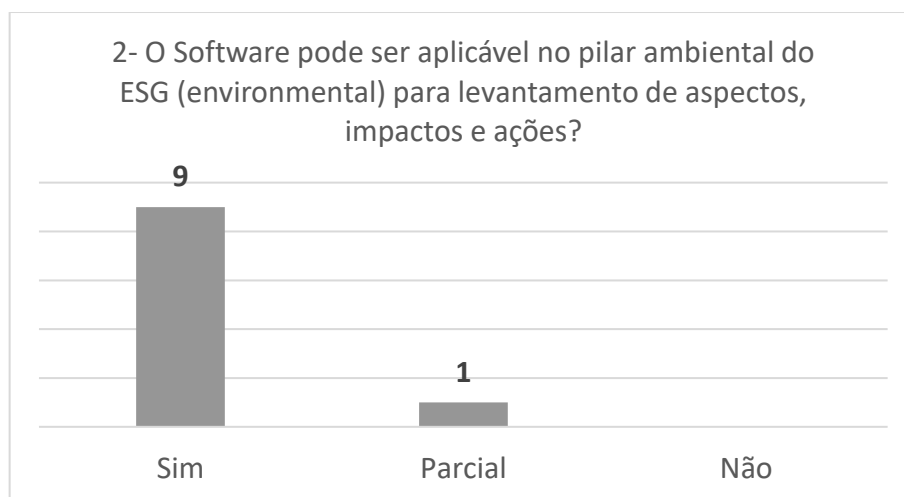


Fonte: elaborado pelo autor (2025)

O resultado demonstra que nove avaliadores recomendam o software para ser aplicado como suporte à gestão da ISO 14001:2015.

O Gráfico 11, demonstra as respostas da questão 2:

Gráfico 11 – Resultado da Entrevista da Questão 2

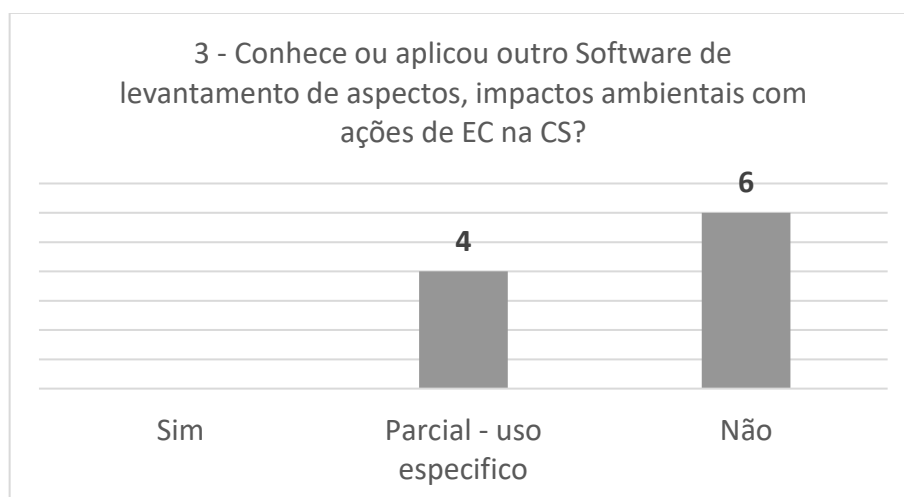


Fonte: elaborado pelo autor 2025

O resultado demonstra que 9 avaliadores recomendam o software para ser aplicado no pilar ambiental no ESG para levantamento de aspectos.

O Gráfico 12, demonstra as respostas da questão 3:

Gráfico 12 - Resultado da Entrevista da Questão 3



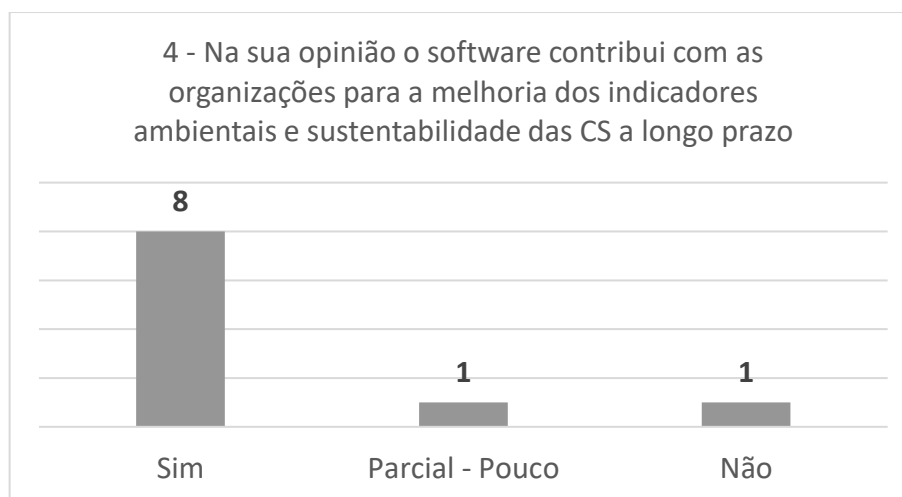
Fonte: elaborado pelo autor (2025)

O resultado demonstra que seis entrevistados desconhecem e não aplicaram o software de levantamento de aspectos considerando os pilares de Economia Circular como ações, e quatro afirmam conhecer apenas softwares específicos de levantamento de aspectos e impactos

ambientais. Supondo que o diferencial do software seja as ações embasadas em economia circular nas cadeias de suprimentos.

O Gráfico 13, demonstra as respostas da questão 4:

Gráfico 13 - Resultado da Entrevista da Questão 4



Fonte: elaborado pelo autor

O resultado demonstra que 8 entrevistados entendem que, a longo prazo, as ações circulares podem contribuir para os indicadores de sustentabilidade. Um dos entrevistados acredita que a contribuição será pequena, pois não tem confiança nas ações, e outro afirma que o software não irá melhorar os indicadores, mas sim as estratégias da empresa.

Na sequência, são apresentadas as entrevistas estruturadas individuais sobre a validação e aplicação do software de gestão de levantamento de aspectos e impactos ambientais com base em ações de economia circular em cadeias de suprimentos.

4.4.1 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 1

A profissional 1, da empresa que fabrica expositores de produtos processados para o consumidor final, teve a tarefa de mapear a cadeia de suprimentos no aspecto ambiental, conforme exigido pelo cliente que vende os produtos processados desta empresa.

Após assistir à apresentação conceitual e às instruções do software, a responsável da empresa pelo Sistema de Gestão Integrada (SGI) utilizou o software de apoio ao Sistema de Gestão Ambiental nas Cadeias de Valor Sustentáveis deste produto, conforme a exigência de seu cliente quanto aos pilares de Economia Circular. Ela respondeu a uma pesquisa estruturada, conforme Tabela 7:

Tabela 7 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 1

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável da Validação e Teste
1 - Formação, Especialista, Função	Engenheira Civil, Gestão de projetos, Engenharia de processos e Qualidade, Gerente de Qualidade
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Sim, o software é aplicável para os requisitos da norma ISO 14001 relacionados ao levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais, bem como às ações corretivas e de melhoria.
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Sim, o software é aplicável no contexto do pilar ambiental do ESG e pode ser utilizado para a implementação de ações ambientais visando à excelência em sustentabilidade nas cadeias de suprimentos. Ele auxilia as organizações na identificação e gestão dos impactos ambientais, na implementação de medidas corretivas e na promoção de uma cultura de sustentabilidade em toda sua rede de fornecedores e parceiros comerciais
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Conheço outras planilhas, porém não contém o pilar de economia circular. Certamente existe a possibilidade de indicar a utilização do software, pois tive uma experiência muito produtiva na utilização
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Sim, pode desempenhar um papel importante ao fornecer suporte e insights para as organizações que buscam melhorar seu desempenho ambiental a longo prazo.
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	Se continuar no Excel, tudo bem, porém, se utilizar outros softwares, é importante pensar na complexidade da integração. APIs flexíveis facilitariam a integração do software com outros sistemas utilizados pela organização. Se implementarem requisitos legais, é necessário o monitoramento de tendências regulatórias e atualizações regulares do software para garantir sua relevância e eficácia a longo prazo.

Fonte: Transcrita pelo Autor

Ainda, no desenvolvimento do produto de acordo com a exigência do conceito de economia circular pelo cliente, uma resposta a ser considerada foi que:

“Durante o desenvolvimento do projeto, a exigência do nosso cliente era clara: cumprir rigorosamente os requisitos ambientais com foco na economia circular e sustentabilidade. O software Análise de Aspectos e Impactos Ambientais tornou-se nosso aliado crucial nesse processo. Ele nos ajudou a identificar e avaliar minuciosamente os aspectos e impactos

ambientais em toda a cadeia de suprimentos. Com o suporte do software, conseguimos implementar medidas corretivas de maneira eficiente, gerenciar riscos e aproveitar oportunidades ambientais de forma contínua. Graças a essa ferramenta, superamos as expectativas ambientais do cliente, garantindo que cada etapa do processo promovesse a sustentabilidade e refletisse nosso compromisso com a excelência ambiental.” (Responsável por Teste, 2024)

Resumidamente, afirma que o software é aplicável na ISO 14001 e ESG-Ambiental em melhorias, que não conhece software com ações circulares nos aspectos nas cadeias de suprimentos tornando-as sustentáveis, teve uma experiência positiva com o uso do software aplicando para melhorar os indicadores a longo prazo e sugere como melhoria a integração do software com outros softwares da organização, como ERP entre outros.

4.4.2 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 2

O profissional 2, da empresa que fabrica peças metálicas para serem usadas em veículos automotores nas montadoras ou no mercado de reposição, desenvolve processos de fornecedores e testou o software em um dos seus processos de retífica de metal.

O responsável pela empresa em auditorias (ISO), engenheiro e mestre em programas ambientais, utilizou o software de apoio ao Sistema de Gestão Ambiental nas Cadeias Produtivas Sustentáveis em uma etapa do processo de retífica, planilhando os aspectos e impactos ambientais e plano de ações com base nos pilares de Economia Circular. Ele respondeu a uma pesquisa estruturada conforme apresentado na Tabela 8:

Tabela 8 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 2

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Especialista em Engenharia de Produção / Ambiental /Auditor ISO-IATF, Engenheiro de Desenvolvimento de Fornecedores.
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Sim, o software pode ser aplicado como ferramenta auxiliar no Sistema de Gestão Ambiental, contudo base de dados deve ser suficiente abrangente aos diversos segmentos que necessitam da certificação ISO14001, e outras normas voltadas ao contexto ambiental.
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Parcial, pois o software apresenta tecnologia diretamente a questões ambientais e sociais, contudo a parte do contexto de governança necessita de melhoria.

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Outros softwares são para temas específicos como ACV, porém software para levantamento de aspectos/impactos não tenho conhecimento. Acredito que se o software oferecer certas adaptações e/ou customizações pode ser indicado para empresas.
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Sim
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	O software pode ser aplicado no contexto ambiental e impactos, suporte para definição de indicadores, e economia de recursos. Porém no contexto do SGI as áreas de Qualidade, e Saúde ocupacional e Segurança não são mencionadas.

Fonte: Transcrita pelo Autor

Após assistir à apresentação conceitual e às instruções do software, o profissional testou e validou o software na prática, realizando o mapeamento do processo de retificação com levantamento dos aspectos e impactos, classificando a severidade e definindo um plano de ação com ações circulares para mitigar os impactos negativos.

Resumidamente, o profissional afirmou que o software pode ser aplicado como ferramenta auxiliar na melhoria da ISO 14001 e no pilar ambiental do ESG. Ele mencionou que o software poderia sofrer adaptações e customizações por empresas especializadas em software integrador, que o software contribui para a melhoria dos indicadores, e que o software atende apenas ao pilar ambiental do SGI.

4.4.3 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 3

O profissional 3, da empresa do segmento de siderurgia, maior produtora de aço do Brasil e uma das principais fornecedoras de aços especiais no mundo, atua na gestão de produtos e processos. Ele testou o software no segmento de fabricação de aço. Responsável pela gestão da empresa fabricante de aços, engenheiro mecânico e pós-graduado em metalurgia e ciência de dados, utilizou o software de apoio ao Sistema de Gestão Ambiental na Cadeia Industrial Sustentável em uma etapa do processo siderúrgico, registrando os aspectos e impactos ambientais e o plano de ações com base nos pilares da Economia Circular. Ele respondeu a uma pesquisa estruturada conforme Tabela 9:

Tabela 9 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 3

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Eng. Mecânico, Especialista da Qualidade, Pós-graduado em Metalurgia e Ciência de Dados, 18 anos de experiência.
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Sim, o software abrange todo o ciclo de trabalho com o tema de gestão dos aspectos e impactos, possibilitando uma rápida e padronizada aplicação, além de proporcionar customização de itens que podem ser mais específicos por tipo de negócio
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Sim, pois o software permite uma fácil visão daquilo que está sendo trabalhado e os resultados esperados com os planos de ação
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Não, até o momento não havia tido o contato com uma ferramenta que trouxesse o conceito circular para o tema de AIA
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Sim, pois a cada ciclo de melhoria é possível acompanhar a evolução das ações e consequentemente justificar os resultados obtidos nos indicadores ambientais
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	Para mim não ficou claro como o software entrega de forma visual para a gestão de todo o trabalho, talvez a implementação de um módulo de versionamento e de dashboards facilitaria o uso em empresas

Fonte: Transcrita pelo Autor

Testou e validou o software, assistiu à apresentação conceitual e às funções do software, e analisou as aplicações em seus processos empresariais de siderurgia e outros processos.

Resumidamente, o profissional 3 afirma que o software abrange todo o ciclo de trabalho para gestão dos aspectos e impactos ambientais, possibilitando a padronização ou itens mais específicos e customizados. Permite fácil visualização para planos de ação e resultados, destacando o diferencial da análise de impactos ambientais. É possível melhorar os indicadores ambientais e sugere uma melhoria do software na visualização dos resultados com dashboards ou gráficos.

4.4.4 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 4

A profissional 4, da empresa do segmento de energia eólica no Nordeste e atualmente na educação tecnológica superior no Brasil. A profissional tem formação em engenharia de produção, e atua na área de SGI e Gestão. Respondeu uma pesquisa estruturada conforme Tabela 10:

Tabela 10 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 4

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Mestre em Gestão, Logística e Pesquisa Operacional
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Sim. Pode ser uma ferramenta que permite identificar os impactos ambientais na cadeia de suprimento e permitir ao sistema de gestão integrado informações
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Sim, pois permite identificar os impactos e auxiliar na governança, não somente da empresa como nos clientes e fornecedores.
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Há uma infinidade de usos possíveis, com pequenas adaptações para modelos de negócios diferentes, que podem melhorar a governança como um todo.
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Principalmente nas ações de longo prazo, visto permitir as adequações necessárias em ambientes complexos como o atual em relação as mudanças climáticas.
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	As principais dificuldades é encontrar analistas treinados para identificar as questões relacionadas a economia circular e treinados para obter as informações relevantes ao processo.

Fonte: Transcrita pelo Autor

Assistiu à apresentação conceitual e as funções do software, testou e validou o software simulando exemplo em aplicação de produtos de torres de energia eólica.

Resumidamente a profissional 4, afirma que o software permite identificar os impactos ambientais nas cadeias de suprimentos e fazer a gestão, permite identificar impactos nos clientes e fornecedores, uma infinidade de aplicações em vários segmentos com adaptações, pode melhorar os indicadores ambientais a longo prazo contribuído com diminuição das mudanças

climáticas e a principal dificuldade é encontrar analistas treinados para identificar as questões relacionadas a economia circular e obter as informações relevantes ao processo.

4.4.5 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 5

O profissional 5 é da empresa do segmento de autopeças para tratores, máquinas agrícolas e caminhões, uma empresa alemã instalada no Brasil. O profissional tem formação em engenharia de produção e atua na área da qualidade, desenvolvendo fornecedores na cadeia de suprimentos da empresa. Respondeu a uma pesquisa estruturada conforme a Tabela 11:

Tabela 11 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 5

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Administração e Engenharia de Produção, Engenheiro de Desenvolvimento de fornecedores
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Sim com certeza poderá ser aperfeiçoado para direcionar melhor todos os esforços para a não degradação do meio ambiente
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Com certeza essa iniciativa pode direcionar os esforços, visto que existe uma grande necessidade de atuação no problema e pouco material de suporte disponível.
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Não conheço nada específico, somente trabalhos direcionar a redução do CO2 na cadeia automotiva, porém com pouca informação ainda.
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Sim esse projeto pode ser valioso no direcionamento para toda a cadeia.
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	O tema é bastante complexo e existem grandes dificuldades em se iniciar os projetos onde a minha primeira sugestão seria a criação de um banco de dados com todas as lições aprendidas e cases de sucesso, a segunda seria metodizar talvez em forma de software os cálculos de emissões de CO2.

Fonte: Transcrita pelo Autor

Assistiu à apresentação conceitual e às funções do software, e analisou possíveis aplicações no desenvolvimento de fornecedores de diversos segmentos.

Resumidamente, o profissional 5 afirmou que com certeza o software poderá ser aperfeiçoado para direcionar melhor os esforços contra a degradação do meio ambiente. Ele observou que há uma grande necessidade de atuação no problema e pouco material de suporte disponível. Embora não conheça software específico de levantamento de aspectos e impactos ambientais no conceito dos pilares da economia circular, ele mencionou esforços direcionados à redução de CO₂ na cadeia automotiva, embora com pouca informação.

O projeto pode ser valioso no pilar ambiental das cadeias de suprimentos, contribuindo para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade a longo prazo. No entanto, ele ressaltou que o tema é bastante complexo e existem grandes dificuldades para iniciar os projetos. Sua primeira sugestão para melhorar o software e sua aplicabilidade seria a criação de um banco de dados com todas as lições aprendidas e casos de sucesso. A segunda sugestão seria metodizar, talvez em forma de software, os cálculos de emissões de CO₂ para critério de severidade.

4.4.6 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 6

O profissional 6, da empresa do segmento de autopeças no Brasil, tem formação em engenharia de produção e respondeu uma pesquisa estruturada conforme Tabela 12:

Tabela 12 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 6

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Engenheiro de Produção com especialização em Gerenciamento de Projetos - Engenheiro de Qualidade SGQ
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Sim, o software pode ser aplicado com certeza ao Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015, parece atender bem aos requisitos relacionados ao levantamento de riscos, oportunidades e gestão de aspectos e impactos ambientais além de ajudar nas ações corretivas e na melhoria contínua.
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Sim, ele pode contribuir no pilar ambiental do ESG, especialmente por auxiliar no levantamento de aspectos e impactos ambientais, essencial para alcançar melhores práticas de sustentabilidade nas cadeias de suprimentos.
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Eu conheço outros softwares que trabalham com levantamento de aspectos ambientais, porém acredito que esse pode ser ajustado ou recomendado para empresas, dependendo das suas necessidades específicas. Ele parece ter potencial para se adaptar bem as diferentes realidades de cada empresa ou segmento específico.

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Na minha opinião sim. O software tem grande potencial para ajudar as organizações a melhorarem os indicadores ambientais e promover a sustentabilidade nas cadeias de suprimentos ao longo do tempo.
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	Acho que todo novo software enfrenta dificuldade de resistência inicial das empresas como falta de treinamento adequado e integração com sistemas já existentes. A única sugestão seria tornar o software ainda mais simples, investir em capacitação e garantir que ele possa se integrar a outras ferramentas utilizadas pelas organizações, tornando assim mais fácil a aceitação por elas.

Fonte: Transcrita pelo Autor

Assisti à apresentação conceitual e as funções do software, testou e validou o software respondendo sobre aplicação do software em fornecedores de cadeias de suprimentos e no conceito de melhoria contínua em sistemas de gestão.

Resumidamente o profissional 6, afirma que o software pode ser aplicado na ISO 14001 atendendo os requisitos de levantamento de riscos, oportunidades e gestão das ações nos impactos com foco na melhoria contínua, pode contribuir com ESG no pilar ambiental das cadeias de suprimentos, conhece outros softwares de levantamento de aspectos mas esse pode adaptar a vários segmentos específicos, pode ajudar na melhoria dos indicadores e promover a sustentabilidade da cadeia de suprimentos a longo prazo e as dificuldades do software pode ser falta de treinamento e integração dos sistemas e sugere integração com outras ferramentas da empresa para facilitar a aceitação.

4.4.7 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 7

O profissional 7, da empresa do segmento Automação, mobilidade, energia, soluções industriais e empresariais, uma empresa alemã instalada no Brasil, o profissional tem formação em engenharia de produção, atua na área de processos de fabricação. Respondeu uma pesquisa estruturada conforme Tabela 13:

Tabela 13 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 7

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Engenheiro Produção, Pós-graduação em engenharia de segurança trabalho e administração de empresa
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3)	Parcial, no meu entendimento é uma ferramenta de suporte complementar que pode dar um bom direcionamento.

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Sim, pode ser aplicável, porém não isoladamente, planos de ações complementares podem ser requeridos
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Sim, um software específico para um plano de LAIA
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Indicadores são traçados e determinados de acordo com as exigências do negócio que a empresa e ou a organização está inserida, um software não determina os indicadores, mas pode nortear e contribuir para definição de indicadores.
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	Softwares devem ser criados e desenvolvidos para facilitar o controle e planejamento, logo espera-se que ele seja flexível, de fácil utilização e sem complexidade. Que seja bastante intuitivo para que usuários possam explorar ao máximo as ferramentas, informações e seja possível gerar gráficos por exemplo.

Fonte: Transcrita pelo Autor

Assistiu à apresentação conceitual e as funções do software, e analisou possíveis aplicações em processos de fabricação diversos.

Resumidamente o profissional 7, entende que é uma ferramenta complementar para ISO 14001, pode ser aplicado no ESG como complemento, conhece software específico para LAIA sem considerar a EC na CS, o software não determina a melhoria dos indicadores e sim a organização onde o software está inserido e os softwares devem ser criados e desenvolvidos para facilitar e sem complexidade, bastante intuitivo e gerando relatórios gráficos visuais.

4.4.8 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 8

O profissional 8, da empresa do segmento auditoria de certificação de SGI, o tem formação em tecnologia e gestão empresarial, respondeu uma pesquisa estruturada como se fosse perguntas fechadas sem estruturar suas respostas conforme Tabela 14:

Tabela 14 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 8

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Tecnólogo em Processos, Pós em Gestão da Qualidade - MBA em Gestão Empresarial - Gerente Técnico da Certificadora Quality Service
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Sim - 100%
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Sim - 100%
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Não
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Pouco.
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	Alto Custo para a Aquisição

Fonte: Transcrita pelo Autor

Assistiu à apresentação conceitual e as funções do software, e analisou possíveis aplicações em sistema de gestão integrada, mas definiu a aplicação com resposta simples como se fossem questões fechadas e não de entrevista.

Resumidamente o profissional 8, afirma que é aplicável a ISO 14001 e ESG, não conhece software de levantamento com ações circulares nas cadeias de suprimentos, acredita em pouca melhoria nos indicadores ambientais e que o custo do software é alto para aquisição.

4.4.9 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 9

O profissional 9, da empresa do segmento de óleos lubrificantes, experiente em química de óleos, tem formação em química Industrial, e atua como Gerente Industrial testou aplicação e respondeu uma pesquisa estruturada conforme Tabela 15:

Tabela 15 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 9

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Químico Industrial, Óleo química, Gerente Industrial
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Podem sim e é de fácil manuseio, e auxilia o desenvolvimento dos negócios e pode ajudar no direcionamento das ações.
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Visivelmente que sim, o software ajuda a definição e direcionamento da política do ESG.
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Não utilizei outro até hoje, mas usaria esse com certeza.
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Ele vai contribuir bastante com a organização e melhoria dos indicadores do ESG.
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	A princípio é um software bastante simples e fácil de ser aplicado na prática, sem contar que ele é bastante intuitivo.

Fonte: Transcrita pelo Autor

O profissional 9, assistiu à apresentação conceitual e as funções do software, simulou casos em aplicação na cadeia de suprimentos de óleos lubrificantes. Resumidamente o profissional 9, afirma que é um software auxilia nas ações, direciona a política de ESG e melhoria dos indicadores, e ainda tem fácil aplicação e intuitivo.

4.4.10 Resposta de Teste e Validação do Software - Profissional 10

O profissional 10, da empresa fabricante de redutores, coordenador de aplicação de produto testou aplicação do software na usinagem e respondeu uma pesquisa estruturada conforme Tabela 10:

Tabela 16 - Perguntas e Respostas do Teste e Validação do Software Profissional 10

Pergunta sobre o Software	Resposta do Responsável do Teste e Validação
1 - Formação, Especialista, Função	Engenheiro Mecânico, Coordenador de Aplicação de Produto
2- O Software AAIA pode ser aplicável para suporte no Sistema de Gestão Ambiental da ISO 14001:2015 nos requisitos (6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4; 10.2 e 10.3) de levantamento de riscos e oportunidades dos aspectos e impactos ambientais e suas ações corretivas e melhoria?	Sim, o software auxilia no mapeamento das oportunidades de redução nos impactos ambientais.
3- O Software pode ser aplicável no pilar ambiental do ESG (<i>environmental</i>) para levantamento de aspectos, impactos e ações ambientais para excelência de Sustentabilidade nas Cadeias de Suprimentos?	Sim, pode ser aplicado. Auxiliando a mitigar os impactos ambientais nas cadeias de suprimento.
4- Conhece ou aplicou outro Software de levantamento de aspectos, impactos ambientais com ações no conceito dos pilares da economia circular para excelência em sustentabilidade das cadeias de suprimentos? Existe a possibilidade de ser indicado para utilização e ou adaptado nas empresas?	Sim, conheci o software e indicarei para o setor de saúde, segurança e ambiente da empresa.
5- Na sua opinião o software contribui com as organizações para a melhoria dos indicadores ambientais e sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos a longo prazo?	Sim, o mapeamento de oportunidades de diminuição nos impactos ambientais junto com a implementação de ações circulares criadas a partir deste mapeamento deve contribuir com a melhoria dos indicadores ambientais.
6- Quais as dificuldades e complexidades para as organizações aplicarem o software no SGI e melhoria dos indicadores ambientais nas Cadeias de Suprimentos? Contribua com sugestões para melhoria do software e aplicabilidade.	O público exige cada vez mais softwares intuitivos, onde a necessidade de interpretar orientações de uso seja mínima. No futuro, um software com menos necessidade de interpretação deve ajudar sua popularidade e divulgação.

Fonte: Transcrita pelo Autor

Resumidamente o profissional 10, assistiu apresentação conceitual e as funções do software, simulou casos em aplicação na cadeia de suprimentos de usinagem de aço e cavacos para reciclagem e resumidamente o profissional 10, afirma que é um software que auxilia no mapeamento para mitigar impactos da cadeia de suprimentos, indica a aplicação nas cadeias de suprimentos, a implementação de ações circulares para mitigar impactos deve contribuir com

os indicadores ambientais e sugere um software mais intuitivo com maior facilidade de aplicação.

4.4.11 Resumo Comparativo das Respostas dos Profissionais

O resumo das repostas dos profissionais da validação do software de apoio ao SGA ambiental com base nos pilares da EC para CSS comparando Pontos Positivos X Pontos Negativos, Aplicações X Dificuldades, Robustez X Melhorias são demonstrados na Tabela 17:

Tabela 17 - Resumo das Respostas dos Profissionais

Pontos Positivos / Aplicações / Robustez	Pontos Negativos / Dificuldades / Melhorias
Alinha-se à ISO 14001, contribuindo para o atendimento de requisitos ambientais e suporte ao SGA	Não abrange integralmente o pilar de governança (G) do ESG e não cobre áreas de qualidade e saúde ocupacional
Promove a sustentabilidade nas cadeias de suprimentos e apoia a governança ambiental com fornecedores	Enfrenta barreiras como resistência inicial, falta de treinamento e dependência de planos de ação complementares
Software intuitivo, padronizado, fácil de usar, customizável e aplicável a diferentes setores e modelos de negócio	Necessita integração com sistemas (APIs), dashboards e módulo de versionamento para melhor visualização e controle
Permite definição e monitoramento de indicadores ambientais e apoio na tomada de decisões com base em dados consistentes	Base de dados limitada, ausência de banco de lições aprendidas e falta de benchmarking com outras ferramentas
Mapeia aspectos e impactos ambientais com foco em circularidade, direcionando ações corretivas, preventivas e estratégicas	Alta complexidade de uso em alguns contextos e necessidade de simplificação para maior acessibilidade
Suporta ações de longo prazo, contribui para políticas ESG e responde às mudanças climáticas com flexibilidade	Requer analistas capacitados, suporte técnico contínuo, capacitação e materiais de orientação simplificados
Abrange o ciclo completo de gestão ambiental com potencial de expansão para outros pilares do ESG	Exige melhorias como monitoramento automático da legislação, acessibilidade econômica e novas funcionalidades (ex: SGI completo)
Reconhecido como diferencial competitivo e aplicável como ferramenta de suporte à melhoria contínua dos indicadores ESG e ambientais	Enfrenta dificuldades em projetos iniciais, adaptação fora do contexto ambiental e requer suporte legal e atualização normativa contínua

Fonte: Elaborada pelo Autor

Com base na tabela consolidada, observa-se que os pontos positivos, aplicações práticas e a robustez funcional do software superam significativamente os pontos negativos e barreiras

identificadas. A ferramenta apresenta aderência comprovada à norma ISO 14001, suporte efetivo à governança ambiental e grande potencial de aplicação em cadeias de suprimentos sustentáveis. Sua interface intuitiva, flexibilidade para diferentes setores e capacidade de mapeamento e gestão de aspectos ambientais a tornam um recurso estratégico para organizações que buscam excelência em ESG. Embora existam desafios relacionados à integração tecnológica, capacitação de usuários e necessidade de aprimoramentos visuais e operacionais, esses pontos são pontuais e passíveis de mitigação com investimentos em suporte técnico, treinamento e evolução contínua do software. Portanto, do ponto de vista acadêmico e prático, justifica-se plenamente a aplicação da ferramenta como um instrumento viável, eficaz e promissor para fortalecer a sustentabilidade ambiental e a melhoria contínua nos sistemas de gestão organizacionais.

5 CONCLUSÃO

A aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) com base nos pilares da Economia Circular (EC) é recente, mas apresenta uma tendência crescente de adoção pelas empresas.

As pesquisas sobre o uso prático dessas tecnologias em SGA fundamentados na EC mostram-se promissoras, apontando para benefícios significativos na sustentabilidade ambiental, social e econômica.

O modelo de SGA baseado na EC, com o apoio de tecnologias digitais, proporciona estruturação e otimização dos resultados em Cadeias de Suprimentos Sustentáveis e Cidades Sustentáveis.

Esse modelo, aliado a projetos de software e aplicativos, apoia empresas, cidades e a sociedade no desenvolvimento de produtos sustentáveis e renováveis, promovendo maior durabilidade, possibilidade de reparo, reúso, compartilhamento, locação e parcerias em educação ambiental. Ao fim da vida útil, os produtos podem ser reciclados nas cidades sustentáveis, contribuindo plenamente para a EC.

A aplicação desse modelo de SGA e do software declaratório nas empresas, com base nos conceitos da EC, é essencial para alcançar os objetivos de cadeias de suprimentos sustentáveis.

O Software Declaratório Ambiental é utilizado para identificar os aspectos e impactos ambientais nas cadeias de suprimentos das empresas, atribuindo níveis de severidade aos impactos identificados. Esses dados servem de base para ações mitigadoras, alinhadas aos princípios da EC, visando a conservação sustentável.

Essa ferramenta de gestão ambiental contribui para a melhoria contínua da sustentabilidade nas esferas empresarial, governamental e social. Os dados obtidos podem ser compartilhados de forma transparente entre as partes interessadas, auxiliando no cumprimento de metas globais de sustentabilidade.

O software se destaca por sua inovação ao propor ações circulares para mitigar impactos ambientais, superando limitações de softwares tradicionais. Ele também contribui para melhorias contínuas conforme os padrões da ISO 14001 e práticas ESG.

Ainda que possa ser customizado conforme o sistema organizacional de cada empresa, o software foi testado e validado em uma organização que o utilizou no desenvolvimento de um produto com base nos pilares da EC em sua cadeia de suprimentos.

O desenvolvimento do software por empresas especializadas pode torná-lo ainda mais intuitivo e de fácil aplicação, com tabelas dinâmicas de severidade baseadas em variáveis como créditos de carbono, além de adaptá-lo a contextos específicos.

Em resumo, o uso de SGA com suporte de software representa uma oportunidade inovadora de promover a sustentabilidade organizacional contínua, viabilizando a adoção da Economia Circular em cadeias de suprimentos sustentáveis e Cidades Sustentáveis.

O uso das tecnologias, sistemas, softwares e infraestrutura apresentados no modelo é fundamental para que as cidades se tornem sustentáveis no futuro.

Um dos resultados desta pesquisa foi uma ideia inovadora protegida sob o Processo de Patente nº BR512024000855-1, que pode ser adaptado, aprimorado e aplicado em Sistemas de Gestão Integrada (SGI – ISO) e em iniciativas ESG, sempre com base nos conceitos da Economia Circular.

REFERÊNCIAS

- ABZHANOVA, D. E. A. Development of a database for the main stationary sources of pollution with regulation of emissions quotas. **International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)**, 2024. 504-511. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10629309>>.
- ADA, N. Analyzing barriers of circular food supply chains and proposing industry 4.0 solutions. **Sustainability (Switzerland)**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13126812>>.
- AGNUSDEI, G. P. E. A. Challenges and perspectives of the Industry 4.0 technologies within the last-mile and first-mile reverse logistics: A systematic literature review. **Research in Transportation Business and Management**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100896>>.
- AGRAWAL, R. E. A. Progress and trends in integrating Industry 4.0 within Circular Economy: A comprehensive literature review and future research propositions. **Business Strategy and the Environment**, p. 559-579, 2022. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1002/bse.291>>.
- AGRAWAL, R. E. A. Opportunities for disruptive digital technologies to ensure circularity in supply Chain: A critical review of drivers, barriers and challenges. **Computers and Industrial Engineering**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109140>>.
- AKRAM, S. V. E. A. Implementation of Digitalized Technologies for Fashion Industry 4.0: Opportunities and Challenges. **Scientific Programming**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2022/7523246>>.
- ALCOCER. A Methodological Assessment Based on a Systematic Review of Circular Economy and Bioenergy Addressed by Education and Communication. **Sustainability (Switzerland)**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13084273>>.
- ALEKSIEVA, V. Model of Controlled Environment based on Blockchain and IoT. **4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)**, 2023. 1-4. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10378795>>.
- ALI, E. K. Development of a Real-Time ANN Algorithm Based Performance Management Strategy for Energy Generation System in the Context of Energy 4.0. **IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications**, 2023. 782-786. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10348924>>.
- ALSAMHI, S. H. E. A. Green internet of things using UAVs in B5G networks: A review of applications and strategies. **Ad Hoc Networks**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102505>>.

AMJAD. Leveraging Optimized and Cleaner Production through Industry 4.0. **Sustainable Production and Consumption**, p. 859-871, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.001>>.

ARAGONÉS, R. E. A. Modelo e implementação de uma nova arquitetura IIoT sem bateria alimentada por calor para manutenção industrial preditiva. **MDPI**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/info15060330>>.

ARDAKANI, D. A. E. A. A Fuzzy DEMATEL-FCM approach for analyzing the enablers of the circular economy and Industry 4.0 in the supply chain. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, 2024. Disponível em: <<https://www-scopus-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-85196116749&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=aa7173d056325a6876c47b3f027a261f&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28industry+4.0+circular+economy+supply+chain%29&sl=57&sessi>>.

ARETOULAKI, E. E. A. An Integrated Wildfire Detection, Monitoring, Warning and Emergency Response System Based on Unmanned Aerial Vehicles. **Lecture Notes in Networks and Systems**, 2024. 318-328. Disponível em: <https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/chapter/10.1007/978-3-031-47718-8_22#citeas>.

ARFELIS, S. . R. J. E. A. Architecture Development to Incorporate Industry 4.0 Solutions to Plastics Management: Circular Economy. **Lecture Notes in Networks and Systems**, p. 121-127, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/356423082_Architecture_Development_to_Incorporate_Industry_40_Solutions_to_Plastics_Management_Circular_Economy>.

ARMKNECHT, F. E. A. Fourth International Workshop on Trustworthy Embedded Devices. **Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security**, p. 1548 - 1549, 2014. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1145/2660267.2660384>>.

ARORA, R. IoT-Based Water Quality Monitoring System: Ensuring Health and Well-Being. **International Conference on Computational Intelligence, Networks and Security**, 2023. 1-5. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10450046>>.

ASSAYED, A. E. A. A Case Study from the Food Sector in Jordan. **Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes.**, 2024. Disponível em: <https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/chapter/10.1007/978-981-99-4819-2_5#citeas>.

AZEVEDO, M. T. **Transformação Digital na Indústria - Indústria 4.0 e a rede de água Inteligente no Brasil**. 1a. ed. São Paulo: USP - Escola Politécnica, v. 1, 2017. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-28062017-110639/pt-br.php>>.

AZLAN, A. Industry 4.0 energy monitoring system for multiple production machines. **Mativenga, P.T.**, 2023. 613-618. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.047>>.

BAG, S. . E. A. Relationships between industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: proposal of a research framework. **International Journal of Organizational**

Analysis, p. 864-898, 2022. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1108/IJOA-04-2020-2120>>.

BAG, S. E. A. Application of Industry 4.0 tools to empower circular economy and achieving sustainability in supply chain operations. **Production Planning and Control**, 2021. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1080/09537287.2021.1980902>>.

BAG, S. E. A. Interrelationships between circular economy and Industry 4.0: A research agenda for sustainable supply chains. **Business Strategy and the Environment**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/bse.3502>>.

BAGALAGEL, S. E. A. Product mix optimization model for an industry 4.0-enabled manufacturing-remanufacturing system, 2020. 204-209. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.029>>.

BAGALAGEL, S. M. E. A. A Framework for Industry 4.0 Implementation in Circular Economy Manufacturing Systems, 2022. 997-1005.

BAKSHI, B. R. **Sustainable Engineering: Principles and Practice**. Ohio : Cambridge University Press, 2019. 490 p.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. Porto Alegre - RS: Bookman Editora, 2009. 616 p.

BÁNYAI, T. E. A. Optimization of municipal waste collection routing: Impact of industry 4.0 technologies on environmental awareness and sustainability. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijerph16040634>>.

BARBOSA, M. A. **Dissertação Mestrado PPG em Processos Tecnológicos e Ambientais**. Sorocaba: Universidade de Sorocaba, 2015.

BARRETI, J. M. E. A. Evolution of blockchain technology in sustainable supply chain. **World Review of Intermodal Transportation Research**, 2023. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/storage/f271269531011841.pdf>>.

BECKER, A. E. A. Os conceitos da Indústria 4.0 Associados a Abordagem da Capacidade Dinâmica, 2, 18 jul. 2018. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/engprod/article/view/203>>. Acesso em: 30 ago. 2019. ISSN 2594-4657.

BEKIĆ, D. E. A. Examples of trends in water management systems under influence of modern technologies, 2019. 833 - 842. Disponível em: <<https://doi.org/10.14256/JCE.2728.2019>>.

BELAUD, J.-P. E. A. Big data for agri-food 4.0: Application to sustainability management for by-products supply chain. **Computers in Industry**, p. 41-50, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.006>>.

BHAMBRI, P. Environmental Impacts of Industrial Processes in Industry 4.0 Ecosystem, 2024. 20. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003395416-14/environmental-impacts-industrial-processes-industry-4-0-ecosystem-pankaj-bhambri-sitarani-inderjit-singh-dhanoa-tien-anh-tran>>.

BIAZI, V. E. A. Industry 4.0-based smart systems in aquaculture: A comprehensive review. **Aquacultural Engineering**, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com.ez338.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S014486092300047X?via%3Dihub>>.

BITAR, O. Y. E. A. **Meio ambiente & geologia**. São Paulo: SENAC SP, 2017. cap. 32, p. 499-508.

BLÖMEKE, S. E. A. Recycling 4.0: An Integrated Approach towards an Advanced Circular Economy. **ACM International Conference Proceeding Series**, p. 66-76, 2020. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1145/3401335.3401666>>.

BOIAR, D. E. A. Forecasting Algae Growth in Photo-Bioreactors Using Attention LSTMs. **Software Engineering and Formal Methods. SEFM 2022 Collocated Workshops Conference paper**, 2023. Disponível em: <https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/chapter/10.1007/978-3-031-26236-4_3#citeas>.

BRACCINI, A. M. E. A. Exploring organizational sustainability of Industry 4.0 under the triple bottom line: The case of a manufacturing company. **Sustainability (Switzerland)**, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su11010036>>.

BRADU. Recent advances in green technology and Industrial Revolution 4.0. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20024-4>>.

BRAGA, B. E. A. **Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2a. ed. São Paulo: Pearson, 2021. 336 p.

BRESSANELLI, G. E. A. Towards circular economy in the household appliance industry: An overview of cases. **Resources**, p. 1-23, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/resources9110128>>.

BUMANIS, N. E. A. Data Conceptual Model for Smart Poultry Farm Management System. **Procedia Computer Science**, p. 517-526, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.249>>.

BUSS, P. M. E. A. **É veneno ou Remédio? Agrotóxicos, saúde e Ambiente**. Rio de Janeiro: FUNDAÇÃO FIO CRUZ, 2003. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=UtkXAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA157&dq=buss+et+al+2003&ots=V7CcUxg03f&sig=I5okncVdbhq0Qsf-ICOHUzTiLeU#v=onepage&q=buss%20et%20al%202003&f=false>>. Acesso em: 01 out. 2019.

CAIRNS, J. E. A. A history of biological monitoring using benthic macroinvertebrates. **USV**, p. 32, 1993.

CAPPELLETTI, F. E. A. How de-manufacturing supports circular economy linking design and EoL - a literature review. **Journal of Manufacturing Systems**, p. 118-133, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.03.007>>.

CARDIA, M. E. A. Multitarget Wastewater Quality Assessment in a Smart Industry Context. **International Conference on Intelligent Environments, IE**, 2024. 85-92. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10599915>>.

CASCIANI, D. E. A. Fostering Directions for Digital Technology Adoption in Sustainable and Circular Fashion: Toward the Circular Fashion-Tech Lab. **Systems**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/systems12060190>>.

CHANG, C.-W. Constructing an intelligent shoe production plant using a green supply chain and knowledge management. **Knowledge Management Research and Practice**, p. 46-57, 2022. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1080/14778238.2021.1970488>>.

CHANG, J.-H. E. A. Analysis of Correlation between Secondary PM2.5 and Factory Pollution Sources by Using ANN and the Correlation Coefficient. **IEEE Access**, p. 22812 - 22822, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8078179>>.

CHIAPPETTA JABBOUR, C. J. E. A. Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. **Science of the Total Environment**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138177>>.

COELHO, P. M. N. **Rumo a Indústria 4.0. Dissertação de Mestrado**. Coimbra - Portugal: Universidade de Coimbra. Departamentno de Engenharia mecânica, 2016. Disponível em: <<https://doceru.com/doc/sn08svn>>.

COLPAS, A. -. Internet of Things applied to Aquifer Monitoring Systems: A survey. **Procedia Computer Science**, p. 1090 - 1095, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.066>>.

COSTA, C. D. **Indústria 4.0: o Futuro da Indústria Nacional**. São Paulo: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://seer.spo.ifsp.edu.br/index.php/posgere/article/view/82>>. Acesso em: 03 out. 2019. ISSN 2526-4982.

COSTA, D. G. CheckFoV: A Java tool to compute and draw Field of View, visual overlapping and targets coverage. **Software Impacts**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.simpa.2023.100598>>.

CWIKLICKI, M. E. A. Circular economy and industry 4.0: One-way or two-way relationships? **Engineering Economics**, p. 387-397, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5755/j01.ee.31.4.24565>>.

DA SILVA, T. H. H. E. A. The utilization of Industry 4.0 technologies to enhance the circular economy through the engagement of stakeholders in Brazilian food technology companies. **Business Strategy and the Environment**, 2024. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.3954>>.

DE OLIVEIRA NETO, G. C. E. A. How can Industry 4.0 technologies and circular economy help companies and researchers collaborate and accelerate the transition to strong sustainability? A bibliometric review and a systematic literature review. **Int. J. Environ. Sci. Technol.**, 2023. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13762-022-04234-4>>.

DELGADO-ARCANO, E. A. Lignocellulosic Biomass Transformation Processes into Building Blocks: Focus on Simulation, Optimization, and the Life Cycle Assessment (LCA)

Techniques. **Green Energy and Technology**, 2024. 75-112. Disponivel em: <https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-3-031-51601-6_4>.

DELPLA, V. E. A. Circular manufacturing 4.0: towards internet of things embedded closed-loop supply chains. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2022. Disponivel em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-08058-3>>.

DHANASEKAR, J. Hazardous Area Monitoring System in Industries Using Lora Module. **9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)**, 2023. 2062-2066. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10113005>>.

DI MARIA, E. Industry 4.0 technologies and circular economy: The mediating role of supply chain integration. **Business Strategy and the Environment**, 2022. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1002/bse.2940>>.

DUISEBEKOVA, K. S. E. A. Development of an information-analytical system for the analysis and monitoring of climatic and ecological changes in the environment. **Procedia Computer Science**, p. 578-583, 2020. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.128>>.

DURACCIO, L. E. A. Towards a Quantitative Evaluation of the Relationship between Performance and Environmental Sustainability of Artificial Intelligence Algorithms. **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference**, p. 1-6, 2024. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10560898>>.

EISENREICH, A. E. A. Toward a circular value chain: Impact of the circular economy on a company's value chain processes. **Journal of Cleaner Production**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134375>>.

EL JAOUHARI, A. . E. A. Artificial intelligence of things and circular warehouse process management of automotive parts: conceptual framework and practice review. **International Journal of Process Management and Benchmarking**, p. 109-135, 2024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1504/IJPMB.2024.137789>>.

ELGHAISH, F. E. A. Applications of Industry 4.0 digital technologies towards a construction circular economy: gap analysis and conceptual framework. **Construction Innovation**, p. 647-670, 2022. Disponivel em: <<https://www-emerald.ez338.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/CI-03-2022-0062/full/html>>.

ESMAEILIAN, B. . E. A. Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. **Resources, Conservation and Recycling**, 2020. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105064>>.

FACCHINI, F. E. A. Waste collection with smart bins and residual capacity forecasting: The case of an Apulia Town. **Mediterranean Conference on Control and Automation**, p. 712-717, 2021. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/9480356>>.

FERNANDEZ, C. M. E. A. Fostering awareness on environmentally sustainable technological solutions for the post-harvest food supply chain. **Processes**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/pr9091611>>.

FERNANDO, Y. Practising circular economy performance in Malaysia: managing supply chain disruption and technological innovation capability under industry 4.0. **International Journal of Logistics Research and Applications**, 2022. Disponível em: <<https://www-tandfonline.ez338.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1080/13675567.2022.2107188?scroll=top&needAccess=true&role=tab>>.

FERRARI, A. M. E. A. Dynamic life cycle assessment (LCA) integrating life cycle inventory (LCI) and Enterprise resource planning (ERP) in an industry 4.0 environment. **Journal of Cleaner Production**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125314>>.

FOFOU, R. F. A review on the lifecycle strategies enhancing remanufacturing. **Applied Sciences (Switzerland)**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app11135937>>.

FONTOURA, L. E. A. Real-time energy flow mapping: A VSM-based proposal for energy efficiency. **Journal of Cleaner Production**, 2023. Disponível em: <<https://www-sciencedirect-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652623020292?via%3Dihub>>.

FRANCO, T. E. A. Padrões de industrialização, riscos e meio ambiente. **Ciência & Saúde Coletiva**, p. 61-72, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-81231998000200006>>.

G. PANT, P. E. A. Waste Management System with Technological Intervention: Advantages and Challenges. **International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems, ICESC**, 2023. 1461-1466. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10193334>>.

GAFAR, R. E. A. User-Centric Energy Efficiency Interface for Manufacturing Industry. **Studies in Systems, Decision and Control**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-66218-8_32>.

GALPAROLI, S. E. A. Semi-automated PCB Disassembly Station. In: TERZE, P. R. E. S. **New Business Models**. [S.l.]: [s.n.], 2021. p. 35-48. Disponível em: <<https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/51980/978-3-030-74886-9.pdf?sequence=1#page=42>>.

GARCÍA-MUIÑA, F. E. A. Industry 4.0-based dynamic Social Organizational Life Cycle Assessment to target the social circular economy in manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129439>>.

GARRIDO-HIDALGO, C. E. A. IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and Sustainable Industry 4.0. **IEEE Access**, p. 28417 - 28437, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/8361418>>.

GARRIDO-HIDALGO, C. E. A. An end-to-end Internet of Things solution for Reverse Supply Chain Management in Industry 4.0. **Computers in Industry**, 2019. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103127>>.

GEBHARDT, M. E. A. Industry 4.0 technologies as enablers of collaboration in circular supply chains: a systematic literature review. **International Journal of Production Research**, p. 6967-6995, 2022. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1080/00207543.2021.1999521>>.

GHOREISHI, M. E. A. The Case of Fabric and Textile Industry: The Emerging Role of Digitalization, Internet-of-Things and Industry 4.0 for Circularity. **Lecture Notes in Networks and Systems**, p. 189-200, 2022.

GHOREISHI, M. E. A. The Impact of Artificial Intelligence on Circular Value Creation for Sustainable Development Goals. **Philosophical Studies Series**, 2023. Disponivel em: <https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-3-031-21147-8_19>.

GODINHO FILHO, G. E. A. The Relationship between Circular Economy, Industry 4.0 and Supply Chain Performance: A Combined ISM/Fuzzy MICMAC Approach. **Sustainability (Switzerland)**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/su14052772>>.

GONÇALVES, M. L. E. A. Circular Economy in the Food Chain: Production, Processing and Waste Management. **Circular Economy and Sustainability**, 2023. 1405-1423. Disponivel em: <<https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s43615-022-00243-0>>.

GONCHAROV, D. V. E. A. Methods, Models and Hardware-Software Complex of Distributed Monitoring Based on Iot and Blockchain Technology. **International Russian Smart Industry Conference**, 2024. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10515371>>.

GORBUNOVA, A. V. E. A. Prospects and opportunities for the introduction of digital technologies into aquaculture governance system. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2020. Disponivel em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/422/1/012125>>.

GRANDA, A. Agencia Brasil. **Agencia Brasil - Rio de Janeiro**, 05 jun. 2022. Disponivel em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-06/indice-de-reciclagem-no-brasil-e-de-4-diz-abrelpe>>.

GREGORI, F. E. A. Digital Manufacturing Systems: A Framework to Improve Social Sustainability of a Production Site. **Procedia CIRP**, p. 436 - 442, 2017. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.113>>.

GU, Y. E. A. Enterprise financial optimization of precision mechanical manufacturing process based on intelligent materials and thermal environment sensors. **Int J Adv Manuf Technol**, 2024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-024-14758-3>>.

GUALPA. Smart I4.0-Based Irrigation System for Optimization in Water Management: A case study. **IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory**

Automation (ETFA), 2023. 1-8. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10275443>>.

GUPTA, H. E. A. 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**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126253>>.

GUPTA, M. K. E. A. Real-time monitoring and measurement of energy characteristics in sustainable machining of titanium alloys. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0263224123015014?via%3Dihub>>.

GUZMÁN, V. E. A. Low-Cost Sensors Technologies for Monitoring Sustainability and Safety Issues in Mining Activities: Advances, Gaps, and Future Directions in the Digitalization for Smart Mining. **MDPI Sensors**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s23156846>>.

HACHISUCA, A. M. M. E. A. AgDataBox-IoT - application development for agrometeorological stations in smart. **MethodsX**, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2215016123004156?via%3Dihub>>.

HASSOUN, A. E. A. Use of industry 4.0 technologies to reduce and valorize seafood waste and by-products: A narrative review on current knowledge. **Current Research in Food Science**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100505>>.

HAWKES. ORIGIN AND DEVELOPMENT OF THE BIOLOGICAL. **Water Research**, p. 964-968, 1998. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00275-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00275-3)>.

HETTIARACHCHI, B. D. E. A. Connecting additive manufacturing to circular economy implementation strategies: Links, contingencies and causal loops. **International Journal of Production Economics**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108414>>.

HETTIARACHCHI, B. D. E. A. Industry 4.0-driven operations and supply chains for the circular economy: a bibliometric analysis. **Operations Management Research**, 2022. Disponível em: <<https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s12063-022-00275-7>>.

HU, I. Research on Industry 4.0 smart grid monitoring and energy management based on data mining and Internet of Things technology. **Thermal Science and Engineering Progress**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102830>>.

HUANG, X. E. A. Development of a low-carbon economy with the dual transformation of economy and energy structure. **International Journal of Global Energy Issues**, 2024. Disponível em: <<https://www.inderscience.com/offers.php?id=137091>>.

ISLAM, M. T. E. A. Recycling Perspectives of Circular Business Models: A Review. **Recycling**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/recycling7050079>>.

ISO14001. **ISO 14001: 2015 - Sistemas de gestão ambiental — Requisitos**. Rio de Janeiro - RJ: ISO ABNT, 2015.

IVANOV, D. E. A. Cloud supply chain: Integrating Industry 4.0 and digital platforms in the “Supply Chain-as-a-Service”. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102676>>.

JABBOUR, L. S. E. A. Are food supply chains taking advantage of the circular economy? A research agenda on tackling food waste based on Industry 4.0 technologies. **Production Planning & Control**, 2023. 967-983. Disponivel em: <<https://doi.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1080/09537287.2021.1980903>>.

JAMWAL, A. E. A. A Framework to Overcome Blockchain Enabled Sustainable Manufacturing Issues through Circular Economy and Industry 4.0 Measures. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, p. 764-790, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2022.7.6.050>>.

JENSEN, J. P. E. A. Enabling Circular Economy Through Product Stewardship. **Procedia Manufacturing**, p. 377-384, 2017. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.048>>.

JUAN CARLOS, A. D. Monitoring system of environmental variables for a strawberry crop using IoT tools. **Procedia Computer Science**, p. 1083-1089, 2020. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.067>>.

JUNAID, M. E. A. Creating a sustainable future through Industry 4.0 technologies: Untying the role of circular economy practices and supply chain visibility. **Business Strategy and the Environment**, 2024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1002/bse.3777>>.

KARAM, S. M. E. A. An Effective Decision-Making Framework for Evaluating the Intelligent Logistics Development Scenarios Performance. **Neutrosophic Sets and Systems**, 2023. Disponivel em: <<https://zenodo.org/records/8271388>>.

KARMAKER, C. L. E. A. Impact of industry 4.0 technologies on sustainable supply chain performance: The mediating role of green supply chain management practices and circular economy. **Journal of Cleaner Production**, 2023. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138249>>.

KATANGLE, S. E. A. Smart Home Automation-cum Agriculture System. **International Conference on Industry 4.0 Technology, I4Tech 2020**, p. 121 - 125, 2020. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9102688>>.

KATZENBEISSER, S. E. A. Fifth international Workshop on Trustworthy Embedded Devices. **Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security**, p. 17156 - 1716, 2015. Disponivel em: <<https://doi.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1145/2810103.2812626>>.

KAUR, I. E. A. Irrigação Automática e Monitoramento de Culturas usando Aprendizado de Máquina e Internet das Coisas. **4ª Conferência Internacional sobre Sistemas Especialistas Sustentáveis**, 2024. Disponivel em: <<https://www.scopus-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-85214850270&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS->

KEY%28Industry+4.0+and+environmental+Monitoring%29&sessionSearchId=f1080f4d2b1c518c223af4c063aeff33&>.

KHADAKE, S. B. E. A. Maximize Farming Productivity through Agriculture 4.0 based Intelligence, with use of Agri Tech Sense Advanced Crop Monitoring System. **15th International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies**, 2024. Disponivel em: <<https://www-scopus-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-85209150352&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28industry+4.0+and+environmental+monitoring%29&sessionSearchId=19e98ea5e30902e5e7e9660d62542a26&>>.

KHALIFE, D. E. A. A Sustainable Circular Business Model to Improve the. **Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications**, 2024. Disponivel em: <<https://jowua.com/wp-content/uploads/2024/07/2024.I2.016.pdf>>.

KHAN, A. S. Connecting reverse logistics with circular economy in the context of Industry 4.0. **Kybernetes**, 2023. Disponivel em: <<https://www-emerald-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/K-03-2022-0468/full/html>>.

KHAN, I. S. E. A. Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. **Journal of Cleaner Production**, 2021. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>>.

KHAN, S. A. R. . E. A. A systematic literature review on circular economy practices: challenges, opportunities and future trends. **Journal of Entrepreneurship in Emerging Economies**, 2022. Disponivel em: <<https://www-emerald.ez338.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/JEEE-09-2021-0349/full/html>>.

KHAN, S. A. R. E. A. Industry 4.0 and circular economy practices: A new era business strategies for environmental sustainability. **Business Strategy and the Environment**, p. 4001-4014, 2021. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1002/bse.2853>>.

KHAN, S. A. R. E. A. Connecting reverse logistics with circular economy in the context of Industry 4.0. **kybernetes**, 2022. Disponivel em: <<https://www-emerald.ez338.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/K-03-2022-0468/full/html>>.

KHAN, S. A. R. E. A. Technological advancement and circular economy practices in food supply chain. **Advanced Series in Management**, 2022. Disponivel em: <<https://www-emerald.ez338.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/S1877-636120220000027005/full/html>>.

KHAN, S. A. R. E. A. The role of block chain technology in circular economy practices to improve organisational performance. **International Journal of Logistics Research and Applications**, p. 605-622, 2022. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1080/13675567.2021.1872512>>.

KINTSCHER, L. E. A. Recycling 4.0-digitalization as a key for the advanced circular economy. **Journal of Communications**, p. 652-660, 2020. Disponivel em: <<http://www.jocm.us/show-244-1586-1.html>>.

KOISHYNSKA, O. Application of Industry 4.0 Technologies to Expand the Functionality of Water Bodies Interactive Maps. **13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies**, 2023. 1-6. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10416532>>.

KRSTIĆ, M. . E. A. Applicability of Industry 4.0 Technologies in the Reverse Logistics: A Circular Economy Approach Based on Comprehensive Distance Based Ranking (COBRA) Method. **Sustainability (Switzerland)**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/su14095632>>.

KRSTIĆ, M. E. A. Logistics 4.0 toward circular economy in the agri-food sector. **Sustainable Futures**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100097>>.

KUMAR, A. E. A. Barriers for adoption of Industry 4.0 in sustainable food supply chain: a circular economy perspective. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 2024. Disponivel em: <<https://www-emerald-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/IJPPM-12-2020-0695/full/html>>.

KUMAR, D. E. A. Coordination of circular supply chain for online recommerce platform in industry 4.0 environment: a game-theoretic approach. **Operations Management Research**, 2023. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12063-023-00384-x>>.

KUMAR, D. E. A. IoT-enabled coordination for recommerce circular supply chain in the industry 4.0 era. **Internet of Things**, 2024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101140>>.

KUMAR, N. E. A. Smart Sensors for Environmental Monitoring in Industry 4.0. **Smart Sensors for Industry 4.0: Fundamentals, Fabrication and IIoT Applications**, 2024. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1002/9781394214723.ch3>>.

KUMAR, P. E. A. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. **Resources, Conservation and Recycling**, 2021. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105215>>.

KUMAR, S. E. A. Evolving Role of Sustainable Procurement in Coming Decades. **Public Administration, Governance and Globalization**, p. 351-383, 2022.

KURNIAWAN, T. A. E. A. Transformation of Solid Waste Management in China: Moving towards Sustainability through Digitalization-Based Circular Economy. **Sustainability (Switzerland)**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/su14042374>>.

KYCHKIN, A. . E. A. IoT -Platform for ML-based Industrial Air Emissions Data Processing. **Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing**, p. pp. 1045-1050, 2022. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/9787190>>.

LAL, K. E. A. Low-cost IoT based system for lake water quality monitoring. **PLoS ONE**, 2024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299089>>.

LANGLEY, D. J. Digital Product-Service Systems: The Role of Data in the Transition to Servitization Business Models. **Sustainability (Switzerland)**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/su14031303>>.

LEI, Z. E. A. How do different Industry 4.0 technologies support certain Circular Economy practices? **Industrial Management and Data Systems**, 2022. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1108/IMDS-05-2022-0270>>.

LEMONS, J. E. A. This paper addresses the design of a system to facilitate individual environmental risk assessment and long-term risk management in the Industry 4.0 work context. The solution is based on IoT to provide data related to workers' exposure to hazardous agent. **Applied System Innovation**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/asi5050088>>.

LIAN, D. -C. A Design of IoT-based Platform for Monitoring Environmental Factors Affecting Plant Growth. **IEEE 6th International Conference on Knowledge Innovation and Invention**, 2023. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10332597>>.

LIBRARY, I. D. **Conclusions and future perspectives**. [S.l.]: Data Fusion in Wireless Sensor Networks, 2019. 313-315 p. Disponivel em: <https://digital-library.theiet.org/content/books/10.1049/pbcel117e_ch13>.

LIN. Developing WSN/BIM-Based Environmental Monitoring Management System for Parking Garages in Smart Cities. **Journal of Management in Engineering**, 2020. Disponivel em: <<https://ascelibrary-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000760>>.

LIU, Q. . E. A. A framework of digital technologies for the circular economy: Digital functions and mechanisms. **Business Strategy and the Environment**, p. 2171-2192, 2022. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1002/bse.3015>>.

LIU, Z. E. A. Carbon footprint assessment in manufacturing Industry 4.0 using machine learning with intelligent Internet of things. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2023. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00170-023-12183-6>>.

LUTHRA, S. E. A. Overcoming barriers to cross-sector collaboration in circular supply chain management: a multi-method approach. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102582>>.

MAHROOF, K. E. A. Drone as a Service (DaaS) in promoting cleaner agricultural production and Circular Economy for ethical Sustainable Supply Chain development. **Journal of Cleaner Production**, 2021. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125522>>.

MAJID, M. E. A. Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review.

Multidisciplinary Digital Publishing Institute - MDPI, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s22062087>>.

MALIK, S. E. A. Internet of Things Enabled Automatic Meter Reading. **International Conference on Smart Devices**, p. 1-5, 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10751420>>.

MANA, R. **Análise da aderência da Indústria 4.0 ao Lean Manufacturing utilizando análise de correspondência múltipla. Dissertação de Mestrado**. Limeira: Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Ciências Aplicadas, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/333055/1/Mana_Renato_M.pdf>. Acesso em: 2 maio 2019.

MANAVALAN, E. . E. A. An analysis on sustainable supply chain for circular economy. **Procedia Manufacturing**, p. 477-484, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.059>>.

MARIUS-CONSTANTIN, M. Upgrading Legacy Automation Equipment to Achieve Industry 4.0 Compatibility. **Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI**, 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10194152>>.

MASA'DEH, R. E. A. The Blockchain Effect on Courier Supply Chains Digitalization and Its Contribution to Industry 4.0 within the Circular Economy. **Sustainability (Switzerland)**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su16167218>>.

MASTOS, T. D. E. A. Industry 4.0 sustainable supply chains: An application of an IoT enabled scrap metal management solution. **Journal of Cleaner Production**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122377>>.

MASTOS, T. D. E. A. Introducing an application of an industry 4.0 solution for circular supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126886>>.

MATARNEH, S. E. A. Industry 4.0 technologies and circular economy synergies: Enhancing corporate sustainability through sustainable supply chain integration and flexibility. **Environmental Technology & Innovation**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103723>>.

MATENGA, A. E. E. A. Blockchain-based Product Lifecycle Management using Supply Chain Management for Railcar Remanufacturing. **Procedia CIRP**, 2023. 486-491. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.082>>.

MATTOS NASCIMENTO, D. L. E. A. Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. **Journal of Manufacturing Technology Management**, p. 607-627, 2019. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1108/JMTM-03-2018-0071>>.

MATTOS NASCIMENTO, D. L. E. A. A sustainable circular 3D printing model for recycling metal scrap in the automotive industry. **Journal of Manufacturing Technology Management**, p. 876-892, 2022. Disponível em: <<https://www->

emerald.ez338.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/JMTM-10-2021-0391/full/html>.

MBOLI, J. S. E. A. An Internet of Things-enabled decision support system for circular economy business model. **Software - Practice and Experience**, p. 772-787, 2022. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1002/spe.2825>>.

METKEWAR, P. S. E. A. Artificial Intelligence of Things (AIoT) in Agriculture 4.0. **Explainable AI (XAI) for Sustainable Development: Trends and Applications**, 2024. 16-34. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003457176-2/artificial-intelligence-things-aiot-agriculture-4-0-metkewar-anuja-bokhare>>.

MMA. Programa Nacional do Meio Ambiente II PNMA II - Fase 2 2009 - 2014 -- Governo Federal. **MMA**, Julho 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/pnma/_arquivos/04_02_manual_monitor_amb_jul09_6.pdf>.

MOHAN KUMAR, E. A. Critical review attacks and countermeasures in internet of things enabled environments. **International Journal of Engineering and Technology(UAE)**, p. 163 - 167, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/10284>>.

MUKHERJEE. Enabling Resource Efficiency Through Reduce, Reuse, and Recycling—A Perspective on “Industrial Networking”. **Lecture Notes in Civil Engineering**, p. 35-50, 2022. Disponível em: <https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/chapter/10.1007/978-981-19-3931-0_3>.

MUKHERJEE, A. A. E. A. Application of blockchain technology for sustainability development in agricultural supply chain: justification framework. **Operations Management Research**, p. 46-61, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12063-021-00180-5>>.

NEGRETE, M. E. A. Socio-environmental implications of the decarbonization of copper and lithium mining and mineral processing. **Resources Policy**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105135>>.

NOVOSJOLOV, M. E. A. Artificial Intelligence for Water Supply Systems. **Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2022. Lecture Notes in Civil Engineering**, 2023. Disponível em: <https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/chapter/10.1007/978-3-031-21120-1_56#citeas>.

NUR-A-ALAM. Smart monitoring and controlling of appliances using lora based iot system. **Designs**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/designs5010017>>.

OCCHIUZZI, C. E. A. Automatic Monitoring of Fruit Ripening Rooms by UHF RFID Sensor Network and Machine Learning. **IEEE Journal of Radio Frequency Identification**, 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/9772686>>.

OLIVEIRA RAMOS, R. E. A. A video processing and machine vision-based automatic analyzer to determine sequentially total suspended and settleable solids in wastewater. **Analytica Chimica Acta**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.339411>>.

PAL, R. E. A. Digitalization in the textiles and clothing sector. **The Digital Supply Chain**, p. 255-271, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91614-1.00015-0>>.

PATIL, A. B. E. A. Opportunities in Critical Rare Earth Metal Recycling Value Chains for Economic Growth with Sustainable Technological Innovations. **Circular Economy and Sustainability**, 2023. Disponivel em: <<https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s43615-022-00204-7>>.

PATIL, A. E. A. Big data-Industry 4.0 readiness factors for sustainable supply chain management: Towards circularity. **Computers and Industrial Engineering**, 2023. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109109>>.

PIEPOLI, A. E. A. The Impact of Industry 4.0 on Business Performance: A Multiple Case Study in the Automotive Sector. **Procedia Computer Science**, 2024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.032>>.

PLEHIERS, P. P. E. A. Artificial Intelligence in Steam Cracking Modeling: A Deep Learning Algorithm for Detailed Effluent Prediction. **Engineering**, p. 1027 - 1040, 2019. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/s19194157>>.

PNRS12305. **Lei Federal 12305 Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: Governo do Brasil, 2010. Disponivel em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.

PRASHANTH, S. E. A. Development and Analysis of Novel IoT based Monitoring System for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Dust Extraction System in an Industrial Environment 4.0. **3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN)**, 2023. 1352-1359. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10266185>>.

PYAGAY, V. T. E. A. Analysis and processing of environmental monitoring system. **Procedia Computer Science**, p. 26-33, 2020. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.006>>.

RAJABI-KAFSHGAR, A. E. A. Circular closed-loop supply chain network design considering 3D printing and PET bottle waste. **Environment, Development and Sustainability**, 2024. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10668-024-04767-3>>.

RAJPUT, S. E. A. Industry 4.0 model for integrated circular economy-reverse logistics network. **International Journal of Logistics Research and Applications**, 2022. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1080/13675567.2021.1926950>>.

RAMOS, N. P ET AL. Monitoramento Ambiental. **EMBRAPA**, Brasília, 2024. Disponivel em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/meio-ambiente/monitoramento->

ambiental#:~:text=O%20monitoramento%20ambiental%20%C3%A9%20um,tend%C3%AAn
cias%20ao%20longo%20do%20tempo.>. Acesso em: maio 2024.

RIZVI, S. W. H. E. A. Circular economy under the impact of IT tools: a content-based review. **International Journal of Sustainable Engineering**, p. 87-97, 2021. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1080/19397038.2020.1773567>>.

ROMERO, C. A. T. E. A. Synergy between circular economy and industry 4.0: A literature review. **Sustainability (Switzerland)**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13084331>>.

ROSENBERG, D. M. E. A. Rosenberg, D.M. & V.H. Resh. 1993. Introduction to freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates, p.1-9.Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates., New York, 1993. 488p.

ROSEIRO-MONTALVO, P. D. Smart Farming Robot for Detecting. **Smart Farming Robot for Detecting Environmental Conditions in a Greenhouse," in IEEE Access**, 2023. 57843-57853. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10146280>>.

SAHAL, R. E. A. Industry 4.0 towards forestry 4.0: Fire detection use case. **Sensors (Switzerland)**, p. 1-36, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s21030694>>.

SAHU, A. E. A. Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. **Journal of Enterprise Information Management**, p. 885-907, 2022. Disponível em: <<https://www-emerald.ez338.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/JEIM-11-2020-0465/full/html>>.

SÁNCHEZ-GARCIA, E. E. A. Revolutionizing the circular economy through new technologies: A new era of sustainable progress. **Environmental Technology & Innovation**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103509>>.

SATYRO, W. C. E. A. Industry 4.0 Implementation Projects: The Cleaner Production Strategy—A Literature Review. **Sustainability (Switzerland)**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su15032161>>.

SCHLEYER, G. E. A. An application for geolocalized sightings of marine fauna supported by a social internet of things approach. **IEEE ICA-ACCA 2018 - IEEE International Conference on Automation/23rd Congress of the Chilean Association of Automatic Control: Towards an Industry 4.0 - Proceedings**, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/8609726>>.

SCHNEIDER, M. Y. E. A. Mathematical modelling is an indispensable tool to support water resource recovery facility (WRRF) operators and engineers with the ambition of creating a truly circular economy and assuring a sustainable future. Despite the successful application of mech. **Water Science and Technology**, p. 2503-2524, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/wst.2022.115>>.

SCHNEIKART, G. E. A. A roadmap towards circular economies in pharma logistics based on returnable transport items enhanced with Industry 4.0 technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107615>>.

SCOPUS. Scopus. **SCOPUS**, 1 jun. 2019. Disponível em: <www.scopus.com>.

SHAHRANI, M. A. A. M. E. A. River Water Quality Robot Embedded with Real-Time Monitoring System: Design and Implementation. **Control and System Graduate Research Colloquium**, p. 46-50, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/9515209>>.

SHARMA, M. E. A. Green logistics driven circular practices adoption in industry 4.0 Era: A moderating effect of institution pressure and supply chain flexibility. **Journal of Cleaner Production**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135284>>.

SHENDE, D. Design Process for Adaptive Spraying of Pesticides Based on Mutual Plant Health Detection and Monitoring: A Review. **Third International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS)**, 2023. 729-733. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10073695>>.

SHILIN, M. E. A. Innovative Digital Tools for Integrated Water Resources Management in Arctic. **Lecture Notes in Networks and Systems**, p. pp. 1239-1246, 2022. Disponível em: <https://link-springer-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/chapter/10.1007/978-3-030-96380-4_136>.

SILVA, L. F. Management of Plastic Waste and a Circular Economy at the End of the Supply Chain: A Systematic Literature Review. **Energies**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15030976>>.

SINDHWANI, R. E. A. Analysis of sustainable supply chain and industry 4.0 enablers: a step towards decarbonization of supply chains. **Annals Operation Research**, 2023. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10479-023-05598-7>>.

SINGH, G. E. A. Internet of Things-Based Devices/Robots in Agriculture 4.0. **Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies**, p. 87-102, 2022. Disponível em: <https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-981-16-6605-6_6>.

SOHAIL SARANG, E. A. oward Real-Time Water Quality Monitoring Using Wireless Sensor Networks. **Sensing Technologies for Real Time Monitoring of Water Quality**, 2023. 285-303. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9781119775843.ch12>>.

SONAWALA, N. M. E. A. Iot protocol based environmental data monitoring. **Proceedings of the International Conference on Computing Methodologies and Communication**, p. 1041 - 1045, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/8282629>>.

SONI, K. E. A. Fusion of Smart Meteorological Sensors, Remote Sensing Techniques, and IoT in Context of Industry 4.0. **Handbook of Metrology and Applications**, 2023. 1067-1092. Disponível em: <https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-981-99-2074-7_55>.

SOROOSHIAN, S. E. A. Link between sustainable circular supply chain and Internet of Things technology in electric vehicle battery manufacturing industry: A business strategy optimization for pickup and delivery. **Business Strategy and the Environment**, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/bse.3905>>.

SOROSTINEAN, R. E. A. Anomaly Detection in Smart Industrial Machinery Through Hidden Markov Models and Autoencoders. **IEEE Access**, 2024. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10530240>>.

SPAGNUOLO, A. E. A. Industrial Drying of Fruit and Vegetable Products: Customized Smart Monitoring and Analytical Characterization of Process Variables in the OTTORTO Project. **MDPI Process**, 2023. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/pr11061635>>.

STEFANUTO, B. IoT-Based Solution to Reduce Waste and Promote a Sustainable Farming Industry. **9th World Forum on Internet of Things**, 2023. 1-6. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10539431>>.

SU, X. The implementation of robotic dogs in automatic detection and surveillance of red imported fire ant nests. **Pest Management Science**, 2024. Disponivel em: <<https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ps.8254>>.

SUBRAMONIAM, R. E. A. Riding the digital product life cycle waves towards a circular economy. **Sustainability (Switzerland)**, 2021. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/su13168960>>.

SUN, L. E. A. Virgin or recycled? Optimal pricing of 3D printing platform and material suppliers in a closed-loop competitive circular supply chain. **Resources, Conservation and Recycling**, 2020. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105035>>.

SUN, X. E. A. Modeling and Analyzing the Impact of the Internet of Things-Based Industry 4.0 on Circular Economy Practices for Sustainable Development: Evidence From the Food Processing Industry of China. **Frontiers in Psychology**, 2022.

TAHMASEBINIA, F. E. A. Exploring the Benefits and Limitations of Digital Twin Technology in Building Energy. **MDPI Applied Sciences Switzerland**, 2023. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/app13158814>>.

TANG, C. E. A. A monitoring and control system of agricultural environmental data based on the internet of things. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, p. 4694 - 4698, 2016. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1166/jctn.2016.5338>>.

TAVANA, M. E. A. A Review of Digital Transformation on Supply Chain Process Management Using Text Mining. **Processes**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/pr10050842>>.

TERRÉS-PUERTAS. Architecting an Open-Source IIoT Framework for Real-Time Control and Monitoring in the Bioleaching Industry. **Applied Sciences (Switzerland)**, 2024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/app14010350>>.

TERZI, P. R. E. S. **New Business Models for the reuse of secondary resources**. Milam: Springer, 2021. 183 p. Disponivel em: <<https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/51980/978-3-030-74886-9.pdf?sequence=1#page=42>>.

THAKUR, A. E. A. A Comprehensive Review on Water Quality Monitoring Devices: Materials Advances, Current Status, and Future Perspective. **Critical Reviews in Analytical**

Chemistry, 2022. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1080/10408347.2022.2070838>>.

THAKUR, A. E. A. A Comprehensive Review on Water Quality Monitoring Devices: Materials Advances, Current Status, and Future Perspective. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, 2024. 193-218. Disponivel em: <<https://www-tandfonline-com.ez338.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1080/10408347.2022.2070838>>.

THOMAS, A. E. A. Industry 4.0 and circular economy model for a sustainable electric vehicle battery with controllable wastewater and carbon emission. **Energy Reports**, 2024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.054>>.

TIWARI, S. E. A. Industry 4.0: Managing the Circular Supply Chain. **Handbook of Research on Designing Sustainable Supply Chains to Achieve a Circular Economy**, 2023. Disponivel em: <<https://www.igi-global.com/gateway/chapter/322243>>.

TOLENTTINI, L. E. A. The Impact of Industry 4.0 on the Steel Sector: Paving the Way for a Disruptive Digital and Ecological Transformation. **MDPI Recycling**, 2023. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/recycling8040055>>.

TRIPATHY, A. E. A. Drivers of lithium-ion batteries recycling industry toward circular economy in industry 4.0. **Computers & Industrial Engineering**, 2023. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109157>>.

TSENG, M.-L. E. A. Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? **Resources, Conservation and Recycling**, p. 146 - 147, 2018. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.028>>.

TSENG, M.-L. E. A. Pathways and barriers to circularity in food systems. **Resources, Conservation and Recycling**, p. 236 - 237, 2019. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.015>>.

TSOLAKIS, N. E. A. Microalgae-based circular supply chain configurations using Industry 4.0 technologies for pharmaceuticals. **Journal of Cleaner Production**, 2023. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136397>>.

ÜNAL, A. F. Impact of Digital Twin Technology Utilization in Manufacturing on Sustainability: An Industrial Case Study. **Portland International Conference on Management of Engineering and Technology**, 2023. 1-10. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/10216885>>.

UNDP. UNDP.org. **UNDP**, 2023. Disponivel em: <<https://www.undp.org/sustainable-development-goals>>. Acesso em: 10 jan. 2023.

UPADHYAY, A. E. A. Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. **Journal of Cleaner Production**, 2021. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130>>.

VALECCE, G. E. A. Solarfertilization: Internet of things architecture for smart agriculture. **International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2019 - Proceedings**, 2019. Disponivel em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/document/8756735>>.

VALENTINI, R. E. A. New tree monitoring systems: From industry 4.0 to nature 4.0. **Annals of Silvicultural Research**, p. 84 - 88, 2019. Disponível em: <<https://journals-crea.4science.it/index.php/asr/article/view/1847>>.

VENANZI, R. E. A. Recent Applications of Smart Technologies for Monitoring the Sustainability of Forest Operations. **MDPI Forests**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f14071503>>.

VENTURA, V. E. A. Blockchain and industrial symbiosis: a preliminary two-step framework to green circular supply chains. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2024. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13762-024-05611-x>>.

VERGARA, S. C. **Começando a definir a metodologia. Projetos e relatórios de pesquisa me administração**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

VOULGARIDIS, K. E. A. IoT and digital circular economy: Principles, applications, and challenges. **Computer Networks**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109456>>.

WATERS, M. E. A. Open Source IIoT Solution for Gas Waste Monitoring in Smart Factory. **Sensors**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s22082972>>.

WATSON, N. J. E. A. Intelligent Sensors for Sustainable Food and Drink Manufacturing. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.642786>>.

WINKLER, D. A. E. A. OPTICS: Optimizing irrigation control at scale. **ACM Transactions on Sensor Networks**, 2020. Disponível em: <<https://dl-acm-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/doi/pdf/10.1145/3372024>>.

WINKLER, R. Air, water, and soil are essential for terrestrial life, but pollution, overexploitation, and climate change jeopardize the availability of these primary resources. Thus, assuring human health and food production requires efficient strategies and technolo. **PeerJ Computer Science**, p. 1-23, 2021. Disponível em: <<https://peerj.com/articles/cs-343/>>.

WIŚNIEWSKA-SAŁEK, A. Managing a Sustainable Supply Chain-Statistical Analysis of Natural Resources in the Furniture Industry. **Management Systems in Production Engineering**, p. 227-234, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.2478/mspe-2021-0028>>.

XIE, Z. E. A. A Multi-Criteria Decision-Making Framework for Sustainable Supplier Selection in the Circular Economy and Industry 4.0 Era. **Sustainability (Switzerland)**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su142416809>>.

YAGOT, M. E. A. Roadmap to Precision Agriculture Under Circular Economy Constraints. **Journal of Information and Knowledge Management**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1142/S0219649222500927>>.

YAGOT, M. E. A. Roadmap to Precision Agriculture Under Circular Economy Constraints. **Journal of Information and Knowledge Management**, 2022. Disponível em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1142/S0219649222500927>>.

YOUSIF, O. S. E. A. Monitoring the Construction Industry towards a Construction Revolution 4.0. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, p. 633 - 641, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.18280/ijstdp.170228>>.

YU, Z. E. A. Circular economy practices and industry 4.0 technologies: A strategic move of automobile industry. **Business Strategy and the Environment**, 2022. Disponivel em: <<https://doi-org.ez338.periodicos.capes.gov.br/10.1002/bse.2918>>.

YUDI, F. E. A. Leftover materials and circular economy 4.0: applications and implications. **International Journal of Procurement Management**, 2023. 346-367. Disponivel em: <<https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJPM.2023.131172>>.

ZAMAN, A. Waste Management 4.0: An Application of a Machine Learning Model to Identify and Measure Household Waste Contamination—A Case Study in Australia. **Sustainability (Switzerland)**, 2022. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/su14053061>>.