

A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA INDÚSTRIA 4.0: o que dizem os estudos sobre a dimensão ambiental da sustentabilidade na indústria?

NATÁLIA LÚCIA DA SILVA PINTO

FACULDADE DE SAÚDE DE PAULISTA (FASUP)

CAIO CÉSAR DE OLIVEIRA SERPA

FACULDADE DE SAÚDE DE PAULISTA (FASUP)

LAURA MARIA ABDON FERNANDES

FACULDADE DE SAÚDE DE PAULISTA (FASUP)

A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA INDÚSTRIA 4.0: o que dizem os estudos sobre a dimensão ambiental da sustentabilidade na indústria?

1 INTRODUÇÃO

Com os avanços nas tecnologias de produção novas problemáticas vieram à tona e ganharam seu espaço, como a preocupação com o meio ambiente. Em paralelo, a questão ambiental se tornou um tema em evidência e passou a ser alvo da atenção mundial. Nesse sentido, foram realizados eventos com o intuito de discutir e achar soluções para os mais diversos focos da questão ambiental.

Na busca por soluções para a questão ambiental, é possível verificar os movimentos ambientalistas, podendo ser citados, por exemplo, a Conferência da Biosfera pela UNESCO (1968), a Conferência de Estocolmo (1972), a Rio 92, a Rio +10 e a Rio +20 e demais eventos contemporâneos (PELICIONI, 2014). Cabe mencionar que, no cenário nacional, existiram esforços para a questão ambiental, como as legislações da Política Nacional de Educação Ambiental e a Política Nacional de Meio Ambiente e, não menos importante, a Constituição Federal de 1988, que discorre sobre o direito ao meio ambiente e a responsabilidade de preservá-lo (PELICIONI, 2014). Tais eventos e marcos legais deixam registros para a humanidade a respeito do meio ambiente, do desenvolvimento sustentável e da responsabilidade em preservá-lo, como a Declaração de Estocolmo, o Relatório Brundtland e a Agenda 21 com os objetivos do desenvolvimento sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável, apresentado no Relatório de Brundtland, como aquele que “atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1988, p. 46).

O desenvolvimento sustentável indica uma transformação progressiva na esfera econômica e na sociedade. Nesse caminho, é preciso considerar a harmonia na exploração dos recursos, no foco dos investimentos, na orientação do desenvolvimento tecnológico e na mudança institucional, para que o seu potencial seja reforçado e as necessidades e aspirações humanas sejam atendidas (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1988). Assim, os recursos naturais devem ser usados com responsabilidade, de forma com que os países em desenvolvimento tenham consciência dos impactos de suas atividades no meio ambiente.

No que diz respeito às formas de produção e ao uso dos recursos, é preciso contemplar o desenvolvimento industrial que a sociedade presenciou ao longo dos anos. As revoluções industriais são frutos da inserção de novas tecnologias no meio econômico, que transformam e trazem impactos nos modos de produção, de modo que influenciam no desenvolvimento econômico e social de cada período, até o momento em que são atualizadas e substituídas por novas tecnologias (LIMA; GOMES, 2020).

A literatura sobre a temática dedica-se a falar da Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0, que é marcada pela busca por um sistema de manufatura viável, utilizando ferramentas tecnológicas avançadas, buscando a melhoria da produção, evitando assim o uso desnecessário de recursos e combatendo a superprodução.

No contexto da Indústria 4.0, é habitual consultar literaturas sobre o aumento de produtividade a partir dessas tecnologias, sendo possível verificar desempenhos proveitosos nos processos produtivos. No entanto, mesmo com os tais avanços, é preciso explorar o papel das novas ferramentas e sua relação com a sustentabilidade. Nesse sentido, podemos contemplar, pelo menos, dois enfoques delineados pela temática da pesquisa. No primeiro é tratado os processos e abordagens relacionados à Indústria 4.0. O segundo trata das práticas sustentáveis seus ganhos e benefícios.

Assim sendo, cabe questionar: **como se dá a sustentabilidade ambiental na Indústria 4.0?** Desse modo, esta pesquisa objetivou analisar, a partir de um estudo bibliográfico no Catálogo de Teses e Dissertações da Capes, a dimensão ambiental da sustentabilidade da indústria na IV Revolução Industrial, verificando as principais ferramentas, ganhos e relações temáticas.

Para compor esse estudo, foi realizado um estudo qualitativo bibliográfico, realizado na plataforma do Catálogo de Teses e Dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), trazendo o panorama da pesquisa nacional. O Catálogo é fundamental para nortear pesquisas e trazer citações de diversos temas, com diversos autores e coautores de áreas distintas. O estudo contará com a análise de 16 teses e dissertações que estão disponíveis na plataforma.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Relatório de Brundtland diz que o desenvolvimento sustentável é aquele que “atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1988, p. 46).

O conceito de sustentabilidade é geralmente definido como a capacidade de se alcançar um grau de desenvolvimento, que atenda às necessidades do momento presente, ao mesmo tempo em que se permita às próximas gerações atenderem às suas necessidades futuras (SACHS, 1993; COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1988).

A respeito do conceito de sustentabilidade, é importante considerar que o desenvolvimento deve ultrapassar os conceitos econômicos. Assim, são apresentadas as dimensões da sustentabilidade, que são: sustentabilidade ecológica, econômica, social, espacial, cultural, psicológica, política nacional e internacional (SACHS, 2002). Nessa seara, o conceito de sustentabilidade e sua divisão entre pilares estratégicos, que são a economia, o meio ambiente e a sociedade precisam estar alinhados para o alcance desenvolvimento sustentável (ELKINGTON, 2011).

A abordagem da sustentabilidade não é restrita e toca diversos contextos históricos e setores socioeconômicos. No que diz respeito ao objeto deste estudo, é preciso observar a indústria e o seu desenvolvimento ao longo da história antes de tratar da temática ambiental.

Como tratado por Lima e Gomes (2020), a introdução de novas tecnologias que transformam o sistema por conta de mudanças qualitativas dão origem às revoluções industriais. Desse modo, as novas tecnologias sustentam o desenvolvimento econômico e social durante um período de tempo até que sejam substituídas ou superadas por outras, que são novas e eficientes. Esse processo de desenvolvimento de tecnologias é histórico e possui especificidades e vão demandar tempo para superar questões técnicas e econômicas.

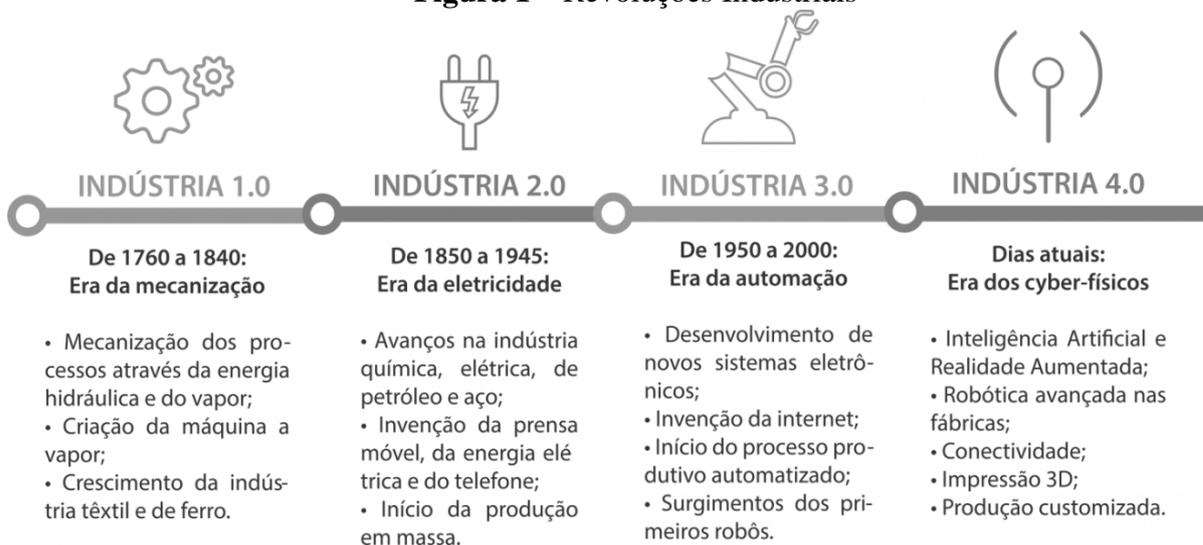
Na contextualização das revoluções, sob a ótica de Lima e Gomes (2020), é possível descrever cada uma, a saber:

- I Revolução Industrial, com a transição do sistema de produção domiciliar para o fabril, associando as siderúrgicas (ferro) e extrativistas (carvão);
- II Revolução Industrial, marcada pela exploração de recursos, como petróleo e borracha, associa-se também o aumento dos meios de produção e crescimento empresarial;
- III Revolução Industrial promoveu mudanças no meio eletrônico, associadas ao uso de computadores e de meios de telecomunicação, bem como o surgimento de outros produtos e serviços ligados à tecnologia.

- IV Revolução Industrial busca um sistema de manufatura viável, utilizando ferramentas tecnológicas avançadas capazes de simular o raciocínio humano, buscando a melhoria no processo produtivo, evitando assim o uso desnecessário de recursos e combatendo a superprodução.

A figura 1, elaborada pelo SENAI – RS (2023), traz o panorama histórico das revoluções industriais e os principais marcos de cada período.

Figura 1 – Revoluções Industriais



Fonte: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (2023)

No mundo do trabalho, novas tecnologias irão desempenhar papéis importantes na disponibilidade do trabalho, de modo que o desenvolvimento tecnológico irá modificar as indústrias e as desafiará para o alcance do sucesso competitivo, sendo possível contemplar mudanças no mercado de trabalho e na produtividade, assim como o conhecimento, as tecnologias, o investimento em ciências de dados e a difusão de novas competências (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2017).

Tal modernização dos processos surge para trazer mais eficácia nos meios de produção e também aos meios de conservação de recursos e ecossistemas. Nessa contextualização, aborda-se o uso desenfreado de recursos e a superprodução, bem como a descentralização de processos para buscar um meio de manufatura viável.

Mesmo no contexto que prima pelo uso de tecnologias para o ganho da produtividade, não se pode esquecer-se de explorar o uso das tecnologias e a relação com a sustentabilidade. De modo que estudiosos apontam que o novo modelo industrial, além de incrementar o desempenho e a produtividade, pode gerar resultados positivos para a sustentabilidade (CARVALHO et al., 2022; SILVA, 2021; SANCHES et al., 2018).

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa é de natureza qualitativa, com finalidade exploratória e descritiva, seguindo a taxonomia de Sampieri, Collado e Lucio (2013) e Vergara (2013). A proposta para a coleta de dados foi a realização de um estudo bibliográfico, que contou com uma consulta ao Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES.

O estudo bibliográfico realizado contou com a avaliação das publicações encontradas no Catálogo de Teses e Dissertações da Capes, escolhido para abordar o que vem sendo tratado sobre a sustentabilidade ambiental na Indústria 4.0 no cenário científico

nacional, permitindo, assim, a análise das publicações relacionadas à temática. Nesse estudo, ainda em fase inicial, foram pesquisados no Catálogo os termos “Sustentabilidade Ambiental” e “Indústria 4.0”. Não foram utilizados filtros para restringir os anos das publicações e as áreas de pesquisa¹.

Foi definido como critério de inclusão para a pesquisa que as teses e dissertações que deveriam estar disponíveis integralmente no Catálogo. De outro modo, os materiais que não tiveram livre acesso foram excluídos da pesquisa. Sendo assim, foram encontradas 18 teses e dissertações e, após a exclusão dos materiais que não atendiam aos critérios da pesquisa, foram selecionadas 16 teses e dissertações para compor este estudo, conforme disposto no quadro 1.

Quadro 1 – Levantamento de Teses e Dissertações

ID	Ano	Título	Autores	Instituição
01	2023	Indústria 4.0 como propulsora da sustentabilidade ambiental rumo à Agenda 2030	Aline Xavier dos Santos Germano	Centro Federal de Educação Tecnológica. Celso Suckow da Fonseca
02	2023	SMART CONSUMPTION – A concept of sustainable consumption in the context of industry 4.0	Michelle Santana Ramos	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
03	2023	AGRICULTURA URBANA 5.0: Proposta de uma arquitetura de sistema e modelo de maturidade	Anna Carolina Dallaneze Ferreira	Universidade Federal do ABC
04	2022	Competências do engenheiro frente aos paradigmas da Indústria 4.0 e da sustentabilidade	Thiago Espinossi Fontanello	Universidade Federal do ABC
05	2022	Modelo de maturidade para integração de sustentabilidade no contexto de desenvolvimento de produtos	Grazielle Fatima Gomes Teixeira	Universidade Católica do Paraná
06	2022	Desenvolvimento de produtos para as camadas menos favorecidas da população	Eduardo da Motta Xavier	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
07	2022	Redução do desperdício de hortifrutis nos supermercados e distribuidores por meio de marketing e tecnologias digitais	Michele de Souza	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
08	2022	Planejamento para implementação digital: Etapas e proposições para melhorar a tomada de decisões táticas e estratégicas	Leandro Zvirtes	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
09	2022	O escopo de uma proposta de certificação sustentável, apoiada no uso de tecnologias digitais	Elcio Ricardo Leite Guimarães	Universidade de Pernambuco
10	2021	A indústria de base florestal, à luz da bioeconomia sustentável: o vetor estratégico do desenvolvimento do estado do Mato Grosso do Sul	Bruno Gouvêa Bastos	Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
11	2021	Industry 4.0 and lean for Sustainability Performance	Ligia Lobo Mesquita	Universidade Federal de São Carlos
12	2021	Influência das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 sobre a sustentabilidade: Enfoque no <i>Tripple Botton Line</i>	Elaine Cristina da Silva	Centro Universitário da Fei
13	2021	Sustentabilidade por meio da Indústria 4.0 e produção mais limpa: múltiplos casos na Indústria automotiva	Aleksander da Conceição Silva	Universidade Nove de Julho
14	2021	Proposta de modelo em redes bayesianas para apoio à tomada de decisão visando produtos sustentáveis	Andre Souza Oliveira	Centro Universitário SENAI-CIMATEC

15	2021	Inovação da moda por meio da impressão 3D: Aspecto técnico-funcional de um não tecido sob perspectiva ambiental	Natani Aparecida do Bem	Universidade Cesumar
16	2021	O direito digital aplicado ao consumo sustentável: Internet das coisas e sustentabilidade	Mateus Catalani Pirani	Unisantos

Fonte: Pesquisa bibliográfica (2023).

Para a análise dos dados, a pesquisa recorreu à Análise de Conteúdo, que consiste em: 1) realizar a pré-análise das ideias iniciais e os seus conteúdos e criar indicadores para categorizar os dados obtidos; 2) analisar e codificar os dados, considerando as unidades de registro e a definição de categorias já estabelecidas; e 3) tratar os resultados para lhes atribuir valor e significado (BARDIN, 2016).

Nesse processo de análise dos dados, neste contexto, a análise de conteúdo, ocorreu da seguinte maneira: 1) Na pré-análise, foram estabelecidos, segundo as literaturas consultadas indicadores de sustentabilidade ambiental na Indústria 4.0 e como se dão seus benefícios no meio ambiente, foram observadas as tecnologias dispostas pela Indústria 4.0 e quais aspectos elas propõem para sustentabilidade e para o meio ambiente, dessa forma, foi possível elencá-las e apontar seus ganhos; 2) os dados foram codificados de acordo com as categorias definidas; e 3) os dados foram analisados para deixarem o seu estado bruto e tornarem-se significativos.

4 ANÁLISE DE DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta seção dedica-se à apresentação dos resultados da pesquisa e a sua análise. Assim, para atender ao objetivo geral, os resultados foram sistematizados em três tópicos, a saber: 1) “A dimensão ambiental da sustentabilidade na Indústria 4.0: uma análise temática”, que apontou a transversalidade da temática nas diversas áreas de conhecimento; 2) “A dimensão ambiental da sustentabilidade na Indústria 4.0: as ferramentas e as tecnologias”, que abordou quais são as principais ferramentas e tecnologias utilizadas e como essas foram discutidas nas teses e dissertações; e 3) “A dimensão ambiental da sustentabilidade na Indústria 4.0: os aspectos ambientais presentes na literatura pesquisada”, que traz a discussão de como a sustentabilidade ambiental é tratada nas pesquisas sobre a Indústria 4.0.

4.1 A DIMENSÃO AMBIENTAL DA SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA 4.0: uma análise temática

Com levantamento realizado foi verificado que as teses e dissertações com a temática da Indústria 4.0 só se dão a partir do ano de 2019. Dito isto, torna-se necessário realizar uma análise sobre a bibliografia localizada e relacionar ao tema proposto, apontar seus benefícios e estender a linha de pesquisa sobre os enfoques apontados na pesquisa.

Na análise das teses e dissertações encontradas foi verificado que os principais temas encontrados são: Gestão da Produção (6), Desenvolvimento Sustentável (1), Engenharias (2), Tecnologias (limpas, ambientais) (3), Sistemas de Qualidade (1), Direito Ambiental (1), Administração Pública (1) e Modelagem Computacional e Sistemas Cognitivos (1).

Foram identificadas diversas áreas temáticas e com isso foi possível verificar a transversalidade da Sustentabilidade Ambiental nas diversas áreas de conhecimento e os seus enfoques, com estudos os seus respectivos resultados, que podem promover mudanças em favor do desenvolvimento sustentável e a sua esfera ambiental.

4.2 A DIMENSÃO AMBIENTAL DA SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA 4.0: ferramentas e tecnologias

Ao analisar a literatura selecionada para o estudo foi possível perceber algumas ligações entre elas, como a forma transversal na qual as ferramentas são utilizadas e os meios e iniciativas de promover a sustentabilidade ambiental.

Notou-se que, os estudos codificados como A01, A02, A04, A05, A07, A10, A12, A15, A16 apresentam o interesse em utilizar as fontes de energias renováveis e meios inteligentes de produção reflete a necessidade de acompanhar os níveis de demanda, de modo a incentivar o uso responsável de energias e de recursos naturais, o que pode ser um indicador de sustentabilidade ambiental.

Também foi possível verificar os estudos codificados como A01, A02, A03, A04, A07, A08, A09, A10, A11, A12, A13, A16 enfatizam a necessidade em coletar, armazenar e transportar os dados de forma segura, garantindo assim análises mais efetivas para otimizar processos ou até mesmo simular cadeias produtivas.

A Indústria 4.0 proporciona possibilidades de promover a sustentabilidade na esfera ambiental. Ramos (2023) correlaciona a Indústria 4.0 com insumos e consumo de energia e água, portanto, vê-se a necessidade do consumo inteligente, que também citado por Silva (2021) ressalta a responsabilidade e eficiência no uso de recursos naturais, reforçando o conceito de *SMART CONSUMPTION*. Para Germano (2023) a sustentabilidade ambiental garante os limites e restrições ecológicas para a produção, fazendo com que a exploração de recursos naturais não ultrapasse as taxas de regeneração.

Já Fontanello (2022) aponta que as causas ambientais como a gestão de recursos, que requer um estudo multidisciplinar entre tecnologias e ciências naturais, Mesquita (2022) também ressalta a adoção de práticas para a sustentabilidade ambiental na indústria, com métodos *Lean e Just in time* (JIT) para métodos de manufaturas, facilitando meios de integração e de fluxos de estoques, além de promoção de inovação.

A implantação de manufaturas viáveis e eficazes nos meios de produção são fatores essenciais para a promoção da sustentabilidade, com a chegada da Indústria 4.0 e suas ferramentas, foi possível otimizar os métodos de produção e propor melhores resultados.

Na análise das teses e dissertações, as tecnologias utilizadas na Indústria 4.0 foram: internet das coisas (IoT), *Big Data*, *CyberSecurity*, Inteligência artificial (IA), Realidade Aumentada (RA), impressão 3D, computação em nuvem, Tec. *Front Ends*, Realidade Virtual (VR), *Blockchain*, Manufatura Aditivada (AM), Robôs colaborativos e Sistemas Cyber Físicos. As tecnologias, as suas definições e a relação de dissertações e teses em que são mencionadas estão listados no quadro 2.

Quadro 2 - Tecnologias utilizadas na Indústria 4.0

Tecnologia	Definições	Tese/Dissertação
Internet das Coisas (IoT)	Uma rede onde se conectam coisas e pessoas, além de poder compartilhar seus dados (GERMANO, 2023).	01, 02, 03, 04, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 16
<i>Big Data</i>	Grande conjunto de banco de dados, que permitem inter-relacioná-los para análises eficientes (CLARKE, 2015.)	01, 03, 07, 09, 10, 11, 12, 13
<i>CyberSecurity</i>	Métodos preventivos para protegerem informações e dados de serem roubados (CULOT, 2019)	01, 04, 12
Inteligência Artificial (IA)	Robôs e máquinas capazes que realizar tarefas sem inteligência humana, ou seja, a I.A pode reproduzir níveis humanos (GERMANO, 2023)	01, 03

Realidade Aumentada (RA)	Tecnologia que sobrepõe elementos virtuais à nossa realidade (GERMANO, 2023).	01, 02, 03, 04, 13
Simulações	Possibilidades de alteração de cenário de forma visual para auxiliar na tomada de decisão (BAI, 2020).	01, 04
Impressões 3D	Produção de baixa escala realizada por uma impressora 3D.	01, 15
Computação em Nuvem	Permite que pessoas se conectem e compartilhem informações de vários locais a partir da internet (GERMANO, 2023).	02, 03, 07, 09, 10, 11, 12, 13
<i>Tec.Front Ends</i>	Conjunto de ferramentas, linguagens e frameworks utilizados no desenvolvimento de um site ou aplicação (RAMOS, 2023).	02
Realidade Virtual (VR)	Tecnologia capaz de criar ambientes virtuais (RAMOS, 2023).	02
<i>BlockChains</i>	Mecanismo de banco de dados que permite o compartilhamento de forma segura e transparente (RAMOS, 2023).	02
Manufatura Aditiva (MA)	Designer digital para a construção de produtos, baseado na deposição de camadas de material (FONTANELLO, 2022).	02, 03, 04, 12, 13, 15
Robôs colaborativos	Capazes de realizar tarefas dispendo de pouca ou nenhuma ajuda humana, tomando decisões a partir de análise de dados (FONTANELLO, 2022).	04, 07, 09
Sistemas <i>Cyber</i> Físicos	Composto por elementos computacionais colaborativos e tem como objetivo controlar itens físicos (MESQUITA, 2021).	04, 11

Fonte: Dados da pesquisa documental (2024)

As tecnologias presentes na Indústria 4.0 viabilizam melhorias em diversas áreas do conhecimento, devido ao seu papel desempenhado e as suas utilidades. As aplicações das tecnologias apresentadas na literatura e a sua contribuição para a sustentabilidade ambiental estão dispostos estão elencados assim:

- Internet das Coisas - proporciona o aprimoramento de processos de produção, que juntamente com Computação em Nuvem, permite ter noções de demanda, evitando possíveis desperdícios (GERMANO, 2023).
- *Big data* - dispõe de um banco de dados extenso possibilitando conexão de sensores a cadeia produtiva gerando esses dados em tempo real, além do tratamento desses dados, oferece modelos sustentáveis a empresas, como a redução de fluxo de materiais, que ocasiona redução de resíduos excessivos (BONILLA, 2018).
- *CyberSecurity* - associado também a *big data*, propõe segurança a possíveis fragilidades dos dados transportados e armazenados, envolvendo fornecedores, possíveis parceiros da cadeia de suprimentos e até mesmo clientes de serviços digitais (GERMANO, 2023).
- Inteligência Artificial e Robôs Colaborativos - auxiliam na tomada de decisão e tratamento de dados, podendo prever com precisão o consumo de materiais que possam causar danos em esferas ambientais, como CO₂, além de trazer suporte a trabalhadores em linhas de produção, apresentando uma maior desempenho a campos onde se apresentam incapacidade ou restrição com operações humanas devido a riscos (SILVA, 2021).
- Realidade Aumentada e Simuladores - utilizam dispositivos móveis e dados em tempo real, que possibilitam a criação de cenários para reproduzir processos ou sistemas, tais

benefícios permitem experiências sem correr riscos, são utilizados principalmente em sistemas de manufatura (TAY, 2018).

- Impressão 3D - permite a produção em baixa escala, podendo imprimir e emitir peças de manutenção que geram economia, além de evitar desperdícios de tempo em processos na produção (BAI, 2020).
- Computação em Nuvem - faz uso de servidores que possibilitam recursos computacionais como armazenamento, serviços, aplicativos e permitem que pessoas tenham acesso a esses recursos de qualquer lugar. Utilizada também para criar modelos de avaliação de custos e eficiência de materiais, auxiliando no ciclo de vida de produtos (GÓMEZ, 2019).
- Realidade Virtual (VR) - possibilita a criação de ambientes virtuais que tornam possíveis simulações para idealizações de cenários a partir de dispositivos em conjunto com Tecnologias, incluindo tecnologias de Front Ends, ferramentas que através de linguagens e *frameworks* permitem desenvolvimento de aplicações. Assim como a realidade aumentada (RA), propõem estratégias de manufatura podendo identificar cada etapa da produção do produto, até seu descarte final (RAMOS, 2023).
- Manufatura Aditiva - considera a deposição das camadas de material disponível, permite criação de designs digitais a baixo custo, possibilitando criação de materiais personalizados, promovendo benefícios industriais, como a metodologia *Just in Time* (JIT) (SILVA, 2021).

Foram verificados ganhos significativos para o meio ambiente, mostrando mais uma vez a relação entre a Indústria 4.0 e a sustentabilidade ambiental. O estudo mostra que a forma na qual são apresentadas e utilizadas as ferramentas, trazem indicadores de sustentabilidade, cabendo um estudo mais aprofundado sobre o tema.

4.3 A DIMENSÃO AMBIENTAL DA SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA 4.0: os aspectos ambientais presentes na literatura pesquisada

Após elencar funções das ferramentas de Indústria 4.0, devemos analisar seus impactos no meio ambiente, visando o objetivo inicial de cada tese ou dissertação. Em busca da sustentabilidade ambiental na Indústria 4.0, podemos verificar maior efetividade e utilização de algumas ferramentas frente às outras e a sua contribuição à questão da sustentabilidade ambiental.

A Internet das Coisas conecta vários componentes de *hardware* por meio da internet e auxilia os processos industriais, promovendo integração que se conectam a objetos físicos, alinhando homem-objeto. Os dados alinhados e captados, podem ser utilizados para otimizar processos de produção, que também cooperam com a computação em nuvem podem fornecer noções de demanda e, conseqüentemente, promover a economia de recursos produtivos, melhorando produtividade e reduzindo impactos ambientais por seu controle de superprodução, assim como ajuda a reduzir o consumo de energia (SILVA, 2021).

A *big data* e seus conjuntos de dados analisados é uma grande estratégia para empresas, tendo em vista que, em conjunto com a IoT, pode verificar a vida de cadeias produtivas e gerar novos dados em tempo real (GERMANO, 2023). Toda essa análise de dados gerados e tratados tem como objetivo otimizar a produção ou processos industriais, tal eficiência em prol da produção promove ganhos em relação a redução do desperdício de energia e de outros recursos básicos. Essa questão se faz presente em objetivos do desenvolvimento sustentável em relação ao meio ambiente.

Bai (2020) ressalta que a produção inteligente idealizada pela Indústria 4.0, resulta em diminuição de gases de efeito estufa e também diminuição da exploração de recursos naturais,

tais oportunidades referentes à sustentabilidade ambiental foram ocasionadas pela adoção dessas ferramentas.

A localização dos indicadores ambientais é fundamental para a evidência do estudo, uma vez que buscamos a sustentabilidade ambiental no meio da Indústria 4.0 e podemos indicar ganhos significativos.

Após elencar os aspectos da sustentabilidade ambiental, é preciso avaliar quais são os efeitos da indústria 4.0 sobre a sustentabilidade ambiental. O quadro 3 apresenta resultados apontados nas literaturas consultadas.

Quadro 3 - Os efeitos da indústria 4.0 sobre a sustentabilidade ambiental

Efeitos da Indústria 4.0 sobre a sustentabilidade ambiental						
ID	Redução do consumo de energia	Redução de resíduos	Redução de gases	Energia renovável	Ciclo de vida de produtos	Redução do consumo de água
A01	X	X	X	X	X	
A02	X	X		X	X	
A03	X	X			X	
A04		X	X	X	X	X
A05	X	X	X	X	X	X
A06					X	
A07		X		X		
A08					X	
A09		X				
A10	X		X	X	X	
A11	X	X	X			
A12	X	X	X	X	X	
A13	X	X	X		X	
A14	X					
A15	X			X	X	
A16				X	X	

Fonte: Dados da pesquisa bibliográfica (2024)

Foi verificado na literatura que, a Indústria 4.0 figura sob os indicadores de sustentabilidade ambiental, no decorrer do estudo foram apontados efeitos positivos da Indústria 4.0 no meio ambiente, reforçando mais uma vez a preocupação com as causas ambientais em meio a produção e também os objetivos da dissertação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após pesquisa realizada na literatura, foi validada a importância da Sustentabilidade Ambiental e sua transversalidade nas áreas de pesquisa.

A busca por uma manufatura viável, que combata a superprodução e desperdício de matéria prima é o principal objetivo da Indústria 4.0, de modo a apresentar soluções para causas ambientais e manter os níveis de produção. Deve-se, então, destacar a eficácia das ferramentas implementadas pela 4ª Revolução Industrial e sua utilidade no combate ao uso desenfreado de recursos naturais, simulando cadeias de produção e possibilitando mais exatidão em tomadas de decisão.

Após analisar a literatura, foram apresentados resultados sobre aspectos ambientais e seus efeitos mediante a chegada da Indústria 4.0. Pôde-se verificar o surgimento de tecnologias oriundas da Indústria 4.0 que trouxeram novas percepções e oportunidades para a sustentabilidade e seus cenários, pode-se destacar a internet das coisas, *big data*, computação em nuvem, realidade aumentada e realidade virtual, manufaturas aditivas, inteligência artificial e também ferramentas de suporte para otimização de processos, como *cybersecurity* e dispositivos de *front ends* que auxiliam operações dessas tecnologias, promovendo melhores resultados em seus campos de atuação.

No meio ambiente, foram apontados ganhos significativos, tendo em vista que a Indústria 4.0 visa um sistema de manufatura viável, que foram otimizados de forma expressiva com o uso inteligente das ferramentas dispostas. A tecnologia vinda da Indústria 4.0 propõe melhorias nos sistemas de produção, trazendo propostas para economia de recursos naturais e também de tempo, fazendo com que os meios de produção se tornem mais limpos e eficazes, além de propor fontes de energias renováveis, reduzindo custos na produção e também matéria prima.

A promoção de indicadores de sustentabilidade reforça o uso das tecnologias de forma inteligente, buscando atender critérios ambientais como redução de resíduos, redução no consumo de água e energia elétrica, monitoramento do ciclo de vida de produtos, redução de gases de efeito estufa, tais critérios servem como base para possível noção na promoção de sustentabilidade ambiental dentro da Indústria 4.0, servindo também como marco para o início de novas pesquisas.

Verificou-se também a necessidade de analisar captar e analisar uma grande variedade de dados para visualizar possíveis cenários, utilizando de simulações para reduzir riscos e possível utilização de materiais nocivos ao meio ambiente. Esse tópico pode constituir *corpus* de novas pesquisas para investigação da sustentabilidade ambiental na Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.

BASTOS, B. G. **A indústria de base florestal, à luz da bioeconomia sustentável: o vetor estratégico do desenvolvimento do Estado de Mato Grosso Do Sul**. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração Pública em Rede Nacional Instituição de Ensino) - Fundação Universidade Federal De Mato Grosso Do Sul, Brasília, 2021.

BEM, N. A. **Inovação na moda por meio da impressão 3D: aspecto técnico-funcional de um não tecido sob a perspectiva ambiental**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Limpas) - Universidade CESUMAR, Maringá - PR, 2021.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Senado: Brasília, DF:1988.

BRASIL. **Lei no 9.795, de 27 de abril de 1999.** Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 1999. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9795.htm>. Acesso em 06 dez. 2023.

CARVALHO, A. D. P.; ZARELLI, P. R.; DALAROSA, B. M.; VIEIRA, A. M. A relação da Indústria 4.0 com a sustentabilidade: uma revisão. **Revista e-TECH: Tecnologias para Competitividade Industrial** - ISSN - 1983-1838, [S. l.], v. 15, n. 1, 2022. Disponível em: <https://etech.sc.senai.br/revista-cientifica/article/view/1197>. Acesso em: 6 ago. 2023.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). **Nosso futuro comum.** Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1988.

ELKINGTON, J. **Sustentabilidade: canibais com garfo e faca.** MBooks: São Paulo, 2011.

FERREIRA, A. C. D. A.. **Agricultura Urbana 5.0: proposta de uma arquitetura de sistema e modelo de maturidade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão da Inovação) - Universidade Federal do ABC, Santo André - São Paulo: 2023.

FONTANELLO, T. E. **Competências do engenheiro frente aos paradigmas da indústria 4.0 e da sustentabilidade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do ABC, Santo André - São Paulo, 2022.

GERMANO, A. L. X. **Indústria 4.0 como propulsora da sustentabilidade ambiental rumo à agenda 2030.** Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Sistemas Produtivos) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Nova Iguaçu, 2023.

GUIMARAES, E. R. L. **O escopo de uma proposta de certificação sustentável, apoiada no uso de tecnologias digitais.** Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão do Desenvolvimento Local Sustentável) - Universidade De Pernambuco, Recife - PE, 2022.

LIMA, F. R.; GOMES, R. Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. **Revista Brasileira de Inovação**, [S.L.], v. 19, p. 01-30, 28 dez. 2020. Universidade Estadual de Campinas.

MESQUITA, L. L. **Industry 4.0 and lean for sustainability performance.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos- SP, 2021.

OLIVEIRA, A. S. **Proposta de modelo em redes bayesianas para apoio à tomada de decisão visando produtos sustentáveis.** Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) - Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2021.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **The Next Production Revolution: Implications for Governments and Business.** OECD Publishing: Paris, 2017.

ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração da Conferência da ONU sobre o Ambiente Humano.** Estocolmo, 1972. Disponível em: <<https://bit.ly/371fQUe>> Acesso em 25 de nov. 2023.

PELICIONI, A. F. Movimento Ambientalista e Educação Ambiental. In: PHILIPPI JR., A.; PELICIONI, M. C. F. **Educação ambiental e sustentabilidade**. 2.ed. São Paulo: Manole, 2014.

PIRANI, M. C. **O direito digital aplicado ao consumo sustentável: internet das coisas e sustentabilidade**. Tese (Doutorado em Direito) - Universidade Católica de Santos, Santos – São Paulo, 2021.

RAMOS, M. S. **Smart consumption – a concept of sustainable consumption in the context of industry 4.0**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre , 2023.

SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. São Paulo: Nobel, 1993.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

SAMPIERI, R.H.; COLLADO, C.F.; LUCIO, P.B. **Metodologia de Pesquisa**. 5ª. Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

SANCHES, B. C.; CARVALHO, E. S.; GOMES, F. F. B.. A Indústria 4.0 e Suas Contribuições à Sustentabilidade. **Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada - Ung-Ser**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 48, 10 jun. 2019.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (Rio Grande do Sul) (org.). **A Indústria 4.0 chegou no Brasil?** Disponível em: <https://www.sesirs.org.br/industria-inteligente/industria-40-chegou-no-brasil>. Acesso em: 06 ago. 2023.

SILVA, A. C. **Sustentabilidade por meio da Indústria 4.0 e Produção Mais Limpa: Múltiplos Casos na Indústria Automotiva**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2021.

SILVA, E. C. **Influência das tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 sobre a sustentabilidade: Enfoque no Tripple Bottom Line**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo 2021.

SOUZA, M. **Redução do desperdício de hortifrúti no varejo por meio de marketing e tecnologias digitais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade do Vale do Rio dos Sino, 2022.

TEIXEIRA, G. F. G. **Modelo de maturidade para integração da sustentabilidade no contexto de desenvolvimento de produtos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba-PR, 2022.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 14.ed. São Paulo: Atlas, 2013.

XAVIER, E. M. **Desenvolvimento de produtos para as camadas menos favorecidas da população.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo - RS, 2022.

ZVIRTES, L. **Planejamento para implementação digital: etapas e proposições para melhorar a tomada de decisões táticas e estratégicas.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos, São Leopoldo - RS, 2022.

ⁱ Não foram definidos filtros por área de conhecimento porque, de acordo com Política Nacional de Educação Ambiental, a questão ambiental é tida como um tema transversal (BRASIL, 1999).