

**A INTER-RELAÇÃO ENTRE INDÚSTRIA 4.0 E ECONOMIA CIRCULAR:
REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

**THE INTERRELATION BETWEEN INDUSTRY 4.0 AND CIRCULAR ECONOMY:
SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW**

**LA INTERRELACIÓN ENTRE LA INDUSTRIA 4.0 Y LA ECONOMÍA CIRCULAR:
REVISIÓN DE LA LITERATURA SISTEMÁTICA**

Victor Natan Pinheiro Kim
Fundação Instituto de Administração (FIA)

Diego de Melo Conti
Professor do Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade,
Pontifícia Universidade Católica de Campinas
<https://orcid.org/0000-0003-1889-0462>

Ernesto D.R. Santibañez Gonzalez
Professor Department of Industrial Engineering, Universidad Talca

Luciano Ferreira da Silva
Professor e pesquisador no Programa de Pós-Graduação em Gestão de Projetos (PPGP) na Universidade Nove de Julho - UNINOVE

Editor Científico: José Edson Lara
Organização Comitê Científico
Double Blind Review pelo SEER/OJS
Recebido em 13/09/2021
Aprovado em 09/10/2022

This work is licensed under a Creative Commons Attribution – Non-Commercial 3.0 Brazil

Resumo

Objetivo do estudo: O objetivo deste artigo é analisar como a inter-relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e Economia Circular influencia na sustentabilidade.

Metodologia/abordagem: O presente artigo fundamentou-se em uma pesquisa exploratória e de caráter qualitativo, por meio da técnica de revisão sistemática da literatura baseada em artigos recentes usando a base de dados da Scopus. O processo de análise objetivou abstrair da literatura estudada explicações para o fenômeno estudado.

Originalidade/Relevância: A Indústria 4.0 e a Economia Circular são duas disciplinas que isoladamente são amplamente estudadas pela academia. No entanto, comparativamente, as aplicações da Indústria 4.0 em Economia Circular são incipientes. Neste sentido, a integração das tecnologias da Indústria 4.0 permite promover uma sociedade mais ecoeficiente na perspectiva da economia circular.

Principais resultados: A análise permitiu concluir que as principais aplicações de Indústria 4.0 estão baseadas em IoT e na sensorização das atividades de produção e gestão de resíduos. Na implementação de estratégias de Economia Circular, verificamos a importância da aplicação de tecnologias digitais para a sua implementação e desenvolvimento, o que pode ser evidenciado na utilização de *digital twin*, *machine learning* e *big data e analytics* para modelar sistemas ecoeficientes.

Contribuições teóricas/metodológicas: As principais contribuições deste trabalho são: 1) a sistematização de artigos recentes, demonstrando a correlação das duas disciplinas e os elementos da Indústria 4.0 citados pelos autores; 2) o detalhamento da integração do *framework* ReSOLVE à luz da Indústria 4.0; 3) uma sugestão de direcionamento para as próximas pesquisas.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Economia Circular; Sustentabilidade; *framework* ReSOLVE.

Study Objective: The aim of this article is to analyze how the interrelationship between Industry 4.0 and Circular Economy technologies influences sustainability.

Methodology/approach: This article was based on an exploratory and qualitative research, using the technique of systematic literature review based on recent articles using the Scopus database. The analysis process aimed to abstract explanations for the studied phenomenon from the studied literature.

Originality/Relevance: Industry 4.0 and Circular Economics are two separate disciplines that are widely studied by academia. However, comparatively, the applications of Industry 4.0 in Circular Economy are incipient. In this sense, the integration of Industry 4.0 technologies makes it possible to promote a more eco-efficient society from the perspective of the circular economy.

Main results: The analysis allowed us to conclude that the main applications of Industry 4.0 are based on IoT and on the sensing of production and waste management activities. In implementing Circular Economy strategies, we verified the importance of applying digital technologies for their implementation and development, which can be seen in the use of digital twin, machine learning and big data and analytics to model eco-efficient systems. **Theoretical/methodological contributions:** The main contributions of this work are: 1) the systematization of recent articles, demonstrating the correlation of the two disciplines

and the elements of Industry 4.0 cited by the authors; 2) detailing the integration of the ReSOLVE framework in light of Industry 4.0; 3) a suggestion of direction for future surveys.

Keywords: Industry 4.0; Circular Economy; Sustainability; ReSOLVE framework.

Objetivo del estudio: El objetivo de este artículo es analizar cómo la interrelación entre las tecnologías de la Industria 4.0 y la Economía Circular influye en la sostenibilidad.

Metodología / enfoque: Este artículo se basó en una investigación exploratoria y cualitativa, utilizando la técnica de revisión sistemática de la literatura basada en artículos recientes utilizando la base de datos Scopus. El proceso de análisis tuvo como objetivo abstraer explicaciones del fenómeno estudiado a partir de la literatura estudiada.

Originalidad / Relevancia: Industria 4.0 y Economía Circular son dos disciplinas separadas que son ampliamente estudiadas por la academia. Sin embargo, comparativamente, las aplicaciones de la Industria 4.0 en Economía Circular son incipientes. En este sentido, la integración de las tecnologías de la Industria 4.0 permite promover una sociedad más ecoeficiente desde la perspectiva de la economía circular.

Principales resultados: El análisis permitió concluir que las principales aplicaciones de la Industria 4.0 se basan en IoT. En la implementación de estrategias de Economía Circular, verificamos la importancia de aplicar tecnologías digitales para su implementación y desarrollo.

Aportes teórico-metodológicos: Los principales aportes de este trabajo son: 1) la sistematización de artículos recientes, demostrando la correlación de las dos disciplinas y los elementos de Industria 4.0 citados por los autores; 2) detallando la integración del ReSOLVE *framework* a la luz de Industria 4.0; 3) una sugerencia de dirección para encuestas futuras.

Palabras llave: Industria 4.0; Economía circular; Sustentabilidad; ReSOLVE *framework*.

1. INTRODUÇÃO

Alavancada pela evolução e popularização da internet, o aumento exponencial na capacidade de processamento de dados e na redução nos custos de dados e na produção de sensores e chips, a Indústria 4.0 vem se tornando um conceito de crescente relevância para a sociedade (Pigola *et al.*, 2021; Martens *et al.*, 2021). Isso pode ser verificado pela implementação de sistemas autônomos, impressão 3D, internet das coisas (*Internet of Things*), *machine learning*, computação em nuvem (*cloud computing*), entre outros, nas atividades no cotidiano das pessoas (Rajput & Singh, 2019).

Este contexto confirma a relevância e adoção das tecnologias da Indústria 4.0, bem como pelo progressivo número de pesquisas realizadas nos últimos 10 anos desde a primeira aparição

do conceito na Hannover Messe em 2011 (Kang *et al.*, 2016). Nós podemos dizer que os avanços tecnológicos destas tecnologias são promissores, mas que também devemos compreender que a sociedade precisa repensar seus padrões de produção e consumo. Como apontam Santibanez Gonzalez *et al.* (2019), a projeção de um crescimento populacional prevê nove bilhões de pessoas em 2050 deve contemplar o consumo de alimentos, água, recursos, além de serviços básicos como transporte e saúde. Somente os alimentos deverão ser acrescidos de 50% em sua produção até 2050. Os autores ainda salientam que se estima que os sistemas de produção deverão ser capazes de fornecer cerca de 140 bilhões de toneladas por ano de minerais, minérios, combustíveis fósseis e biomassa - três vezes o consumo atual.

O relatório *Global Risks* de 2021, do Fórum Econômico Mundial, ao alertar sobre os riscos ambientais críticos, reforça a necessidade de explorar novas abordagens alternativas para os negócios e a academia (Fórum Econômico Mundial, 2020). Em termos de probabilidade, quatro dos cinco riscos mais prováveis de se concretizarem estão relacionados ao meio ambiente, sendo o mais crítico a falha no combate às mudanças climáticas. O próprio relatório sugere, diante desse cenário de emergência global, que tecnologias transformativas como as da Indústria 4.0 podem assumir importantes papéis na superação dessas mudanças globais sem precedentes (Fórum Econômico Mundial, 2020).

A situação supracitada é evidente porque as tecnologias disruptivas da Indústria 4.0 estão redefinindo as economias e as sociedades. Atualmente próteses podem ser impressas em equipamentos 3D, produtores rurais podem ser auxiliados na irrigação de suas plantações por aplicações baseadas em satélites em linha com a agricultura de precisão, carros autônomos podem ser acionados para a locomoção de idosos. Nesta mesma linha, a Internet das Coisas pode auxiliar na diminuição das emissões de carbono com a otimização de energia e redução de congestionamento no tráfego da rede (Fórum Econômico Mundial, 2020).

Contudo, apesar dessa tendência de utilização das tecnologias da indústria 4.0, ainda há muito o que ser explorado sobre os reflexos da Indústria 4.0 na sustentabilidade, mais especificamente, na perspectiva da Economia Circular (Okorie *et al.*, 2018; Rajput & Singh, 2019; Tseng *et al.*, 2018). Um aspecto relevante neste sentido é que pesquisadores tentam compreender as mudanças causadas por tecnologias na sociedade em constante transformação como a reciclagem de resíduos plásticos para transformá-los em insumo para impressoras 3D

(DePalma *et al.*, 2020; Román-Ramírez *et al.*, 2020), elaboração de sistema de Blockchain com multi-sensores e inteligência artificial (Chidepatil *et al.*, 2020) e utilização de sensores a capacidade computacional em nuvem para classificação de resíduos para reintroduzi-los em novos ciclos produtivos (van Engelshoven *et al.*, 2019).

Deste modo, embora essas duas temáticas tenham alta correlação como demonstraram os estudos de Bag *et al.* (2021) e Ma *et al.* (2021), um estudo sobre a literatura realizada por Tseng *et al.* (2018) descreve como estes dois temas são apresentados de forma muito reduzida em artigos publicados. Os autores pesquisaram isoladamente na base de dados *Scopus* por “*Industry 4.0*” e “*Circular Economy*” e encontraram 4060 e 2452 artigos respectivamente. No entanto, ao buscarem combinadamente as duas palavras-chave encontraram apenas três artigos.

Com base neste contexto, este artigo adotou como objetivo analisar como a inter-relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e Economia Circular influencia na sustentabilidade. Portanto, ao inter-relacionar essas duas disciplinas pode-se estimular oportunidades para uma Economia Circular com ganhos, inclusive, para um desenvolvimento social sustentável e ético (Ma *et al.*, 2020).

Nesta perspectiva, a Indústria 4.0 pode auxiliar a redesenhar a Economia Circular, que avança como paradigma de novos sistemas de produção e consumo, além de suas relações com a sustentabilidade e outros conceitos mais relacionados com aspectos sociais (Okorie *et al.*, 2018). Isso porque o modelo exclui grande parte da dimensão social ao enfatizar especialmente o balanço econômico-ambiental (Geissdoerfer *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2020), além de simplificar questões a uma mera questão de entrada de recursos e saída de resíduos (Geissdoerfer *et al.*, 2016).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos da Indústria 4.0, bem as tecnologias e benefícios evidenciados de sua adoção. Além disso, também é assunto desta seção a Economia Circular e como ela se integra com a Indústria 4.0.

2.1 Tecnologias e benefícios da Indústria 4.0

O conceito de Indústria 4.0 foi anunciado pela primeira vez em 2011 pelo governo alemão na Feira de Hannover (*Hannover Messe*) como um projeto para a implementação da produção inteligente ou *smart manufacturing* (Kang *et al.*, 2016). A produção inteligente e a Indústria 4.0 podem ser entendidas como sinônimos e definidas sumariamente como sistemas de produção sustentados pela tecnologia da informação e comunicação; integrados com tecnologias digitais, tendo como principal característica a interconectividade entre máquinas, pedidos, empregados, fornecedores e consumidores (Jabbour *et al.*, 2018; Kang *et al.*, 2016). Contudo, para que esta relação seja naturalizada em alguns ambientes, a Indústria 4.0 tem ganhar uma conotação de produção mais limpa (Rajput & Singh, 2020), sendo reconhecida como um conceito que integra o ambiente ciberfísico em um ecossistema ecoeficiente.

Em linha com as discussões sobre a Indústria 4.0, não há um consenso sobre a definição do conceito e nem sobre as tecnologias compreendidas por ele, que variam de acordo com o autor utilizado. Beier *et al.* (2020) justificam que isso se deve por conta da forte conotação política do termo, cujo objetivo é apoiar a liderança alemã no campo da engenharia de produção. Schwab (2016) ressalta que a Indústria 4.0 surge no contexto da 4ª Revolução Industrial, que é caracterizada como “transição em direção a novos sistemas que foram construídos sobre a infraestrutura da revolução digital (3ª Revolução Industrial)” e não por um conjunto de tecnologias emergentes em si mesmas, como nas revoluções anteriores.

Desde sua primeira aparição em 2011, o conceito de Indústria 4.0 vem ganhando notoriedade com o avanço de tecnologias disruptivas, sustentadas por outras tecnologias, como a Internet das Coisas, *Big Data* e *analytics*, computação em nuvem, sistemas de *Digital Twin* e sistemas ciberfísicos (*cyber-physical systems* – CPS) (Ma *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2016; Rajput & Singh, 2019).

Com relação às tecnologias relacionadas à Indústria 4.0, há um consenso de que a Internet das Coisas é um dos recursos mais relevantes na perspectiva da produção inteligente (Bag *et al.*, 2021). Isto acontece porque ela está associada a outras tecnologias como a inteligência artificial (*Artificial Intelligence*), que permite planejar a logística de veículos, controlar fluxos produtivos e agendar entregas e deslocamento de veículos, entre outras importantes aplicações.

Diversos estudos apontam cenários e benefícios da implementação da Indústria 4.0 (Nascimento *et al.*, 2018). De modo geral, entende-se que a Indústria 4.0 possibilita o controle otimizado de dados operacionais, a eficiência e flexibilidade operacional, a operação de sistemas autônomos, a redução de desperdícios e a tomada de decisão descentralizada (Bag *et al.*, 2021; Jabbour *et al.*, 2018; Kang *et al.*, 2016; Rajput & Singh, 2019). Bag *et al.* (2021, p. 3) reforçam que “o foco principal da capacitação tecnológica da Indústria 4.0 é a melhoria da flexibilidade operacional, eficiência operacional e eficácia operacional, a fim de melhorar o desempenho operacional”. Além disso, os autores apontam que a principal contribuição da Indústria 4.0 é a possibilidade de produzir e acessar informações em tempo real, permitindo maior visibilidade e mitigação de riscos na cadeia de suprimentos. Bag *et al.* (2021) e Dev *et al.* (2019) destacam que apesar de ser um tópico em voga entre pesquisadores, o tema carece de diretrizes para uma aplicação prática, mais especificamente, de como a Indústria 4.0 contribuirá para a gestão das operações nas empresas.

Por outro lado, na perspectiva dos tomadores de decisão, já se conhecem e especulam alguns impactos da implementação da Indústria 4.0. São eles:

- i. a melhoria da eficácia na previsão – com ganhos no grau de visibilidade das operações, no consumo de recursos, na utilização de ativos e no tempo de processamento (Bag *et al.*, 2021);
- ii. a melhoria na capacidade de priorização na programação das operações, pois os sistemas ciberfísicos permitem a definição de conexões entre recursos diversos e os equipamentos de informação na rede produtiva (Dev *et al.*, 2019);
- iii. a melhoria na capacidade de produzir, utilizando de decisões descentralizadas e sistemas autônomos (Jabbour *et al.*, 2018);
- iv. a possibilidade de customização e entrega de valor agregado aos usuários finais (Nascimento *et al.*, 2018);
- v. o aumento da produtividade, pois a Indústria 4.0 possibilita maior capacidade de otimização e simulação (Nascimento *et al.*, 2018); e
- vi. o aumento da competitividade das empresas (Rosa *et al.*, 2020).

Os itens supracitados estimulam o pensamento de que quanto maior for o uso das tecnologias da indústria 4.0, maiores serão os ganhos de eficiência na utilização dos recursos. O relatório da PwC “*Industry 4.0: Building the digital enterprise*” indica uma expectativa média de 4,1% de aumento na eficiência e de 3,6% de redução em custos operacionais ao ano

com a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (PwC, 2016). Isso porque as empresas são capazes de integrar as atividades de planejamento e alocação de recursos, além da manutenção preditiva dos maquinários, apoiada pelas tecnologias da Indústria 4.0, o que também auxilia significativamente na redução do tempo de inatividade e evita atrasos na produção (Bag *et al.*, 2021).

Embora possam ser percebidos vários aspectos positivos, para a implementação da Indústria 4.0 ainda há entraves, pois as tecnologias da Indústria 4.0 são relativamente novas e exigem a superação de limitações técnicas, financeiras e operacionais para que seja realidade (Bag *et al.*, 2021; Martens *et al.*, 2021). Além disso, por ser intensiva em capital, os investimentos nas tecnologias da Indústria 4.0 normalmente ficam restritos às grandes empresas (Nascimento *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2020). Como apontam Nascimento *et al.* (2018), a sua adoção em países emergentes tende a ser menor quando comparada a países desenvolvidos.

Deve-se ressaltar que outra barreira para a sua implementação é o desconhecimento por boa parte das pequenas e médias empresas (Bag *et al.* 2021). Um levantamento da Confederação Nacional das Indústrias – CNI (2016) mostra que 57% das pequenas indústrias brasileiras desconhecem o assunto. Esse fato deve ser observado com preocupação para a competitividade da indústria nacional, dado que pequenas e médias empresas são relevantes para a economia de qualquer país (Bag *et al.*, 2021). Nesse sentido, políticas públicas coordenadas a nível nacional devem ser percebidas como essenciais para a difusão de inovações tecnológicas e inserção das tecnologias da Indústria 4.0 (Bag *et al.*, 2021).

Neste contexto de inovações tecnológicas e desenvolvimento de novos meios para produção em diversos setores, questões relacionadas ao uso consciente de recursos deve ser incorporadas. Embora sejam amplamente divulgadas as questões de sustentabilidade, se faz necessário compreender um sistema de produção e consumo circular. Para que possamos integrar a Indústria 4.0 nas questões da sustentabilidade, os pressupostos da Economia Circular são explorados na próxima seção.

2.2 Economia Circular para repensar produção e consumo

A introdução do conceito de Economia Circular é atribuída por muitos autores a Pearce e Turner na obra “*Economics of natural resources and the environment*” (Geissdoerfer *et al.*,

2016; Nascimento *et al.*, 2018). Pearce e Turner (1990) usaram o termo para propor um modelo econômico sustentado pelo conceito de balanço de materiais que segue a primeira e a segunda leis da termodinâmica enquanto investigavam características lineares e abertas dos sistemas econômicos contemporâneos. No entanto, Geissdoerfer *et al.* (2016) destacam que a concepção do conceito foi influenciada por um trabalho de Boulding de 1966, que descreve a terra como um sistema fechado e circular com capacidade assimilativa limitada e que, portanto, a economia e o meio ambiente devem coexistir em equilíbrio.

Assim como o conceito de Indústria 4.0, não há um consenso sobre a definição de Economia Circular (Okorie *et al.*, 2018). Algumas possíveis justificativas são: i) porque o conceito é empregado por diversos stakeholders; ii) porque sua natureza é complexa e transdisciplinar (Okorie *et al.*, 2018). No entanto, Geissdoerfer *et al.* (2016) argumentam que a definição mais conhecida foi cunhada pela Fundação Ellen MacArthur, a qual apresenta a Economia Circular como “um modelo para uma economia que é restaurativa e regenerativa por definição” (Fundação Ellen MacArthur, 2015b). Cabe ainda destacar que a compreensão atual do conceito e suas aplicações práticas evoluíram para incorporar diferentes recursos e contribuições de diversos conceitos que compartilham a ideia de ciclos fechados (Geissdoerfer *et al.*, 2016).

No Tabela 1 são apresentadas algumas das principais contribuições teóricas sobre Economia Circular.

Tabela 1

Principais conceitos que influenciam a compreensão atual da Economia Circular

Autor(es) e ano de publicação	Conceito
Commoner, 1971	Leis da ecologia
Lyle, 1994	Design regenerativo
Graedel e Allenby, 1995	Ecologia industrial
Benyus, 2002	Biomimética
McDonough e Braungart, 2002	Do berço ao berço
Stahel, 2010	Economia de performance
Pauli, 2010	Economia azul

Fonte: adaptado de Geissdoerfer *et al.* (2016).

O conceito de Economia Circular evoluiu como um novo meio para alcançar a sustentabilidade e se popularizou diante da circulação de materiais, da facilitação do reuso e da

reciclagem e da escassez de recursos (Rajput & Singh, 2019). Uma abordagem relevante, dada à atual “circularidade” do planeta de apenas 8,6%. Caso continuemos a seguir o “*business as usual*”, os recursos do planeta não conseguirão sustentar o crescimento econômico e populacional até 2100 (Circularity Gap Reporting Initiative, 2021), o que reforça a necessidade de uma ação para reverter esse cenário.

O modelo linear predominante, fundamentado na extração, produção, consumo e descarte, leva à escassez de recursos e é incapaz de gerenciar o equilíbrio entre oferta e demanda em consumo de recursos naturais (Okorie *et al.*, 2018). Sob essa perspectiva, a Economia Circular se torna uma alternativa, pois não externaliza custos e riscos associados aos resíduos, pois prioriza a eficiência e a vida útil dos produtos (Geissdoerfer *et al.*, 2016; Okorie *et al.*, 2018).

A Fundação Ellen MacArthur vem se consolidando como uma importante articuladora da Economia Circular (Geissdoerfer *et al.*, 2016; Jabbour *et al.*, 2018), colaborando com governos, empresas e academia. A fundação também é responsável pela elaboração de relatórios de relevância criando, inclusive, um modelo chamado ReSOLVE para auxiliar as organizações a implementarem princípios da Economia Circular em suas atividades. O modelo, que se traduz em seis ações, foi criado a partir de três princípios para Economia Circular (Fundação Ellen MacArthur, 2015a), que são:

- i. Preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando fluxos de recursos renováveis;
- ii. Otimizar os rendimentos por recurso, circulando produtos, componentes e materiais em uso na maior utilidade em todos os momentos nos ciclos técnicos e biológicos; e
- iii. Promover a eficácia do sistema revelando e eliminando externalidades negativas.

É importante lembrar que práticas associadas à Economia Circular, comumente referidas de “abordagens circulares”, não são novas e vêm sendo estudadas pela academia desde 1950, como é o caso dos 3Rs (reduzir, reusar e reciclar), o que pode ser evidenciado desde a 1980 no caso da logística reversa, remanufatura e reforma (Okorie *et al.*, 2018). Korhonen *et al.* (2017) reforçam que, em termos de pesquisa científica sobre a sustentabilidade, há poucos conceitos novos dentro da ideia de Economia Circular.

Muito além do *advocacy* feito pela Fundação Ellen MacArthur, a Economia Circular vem se configurando como um assunto relevante, com crescente interesse pela comunidade científica (Okorie *et al.*, 2018). Geissdoerfer *et al.* (2016) indicam que no período de 2006 a 2016 o número de pesquisas publicadas na Scopus aumentou em mais de dez vezes. Já na perspectiva dos países, a Alemanha em 1996 foi pioneira ao incorporar a Economia Circular em sua legislação nacional, seguida do Japão em 2002 e da China em 2009 (Oliveira *et al.*, 2018).

Neste mesmo sentido, no Brasil foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010, que traz contribuições em termos de Economia Circular, pois prioriza a reciclagem e o emprego de aterros como última opção. Na perspectiva empresarial, observa-se a articulação empresarial, por meio da rede CE100 (com apoio da Fundação Ellen MacArthur), mas também de maneira incremental. Neste contexto, Santibanez Gonzalez *et al.* (2019) reforçam a importância da adoção de políticas e práticas que contemplem a Economia Circular. Os autores informam que a maioria dos produtos eletrônicos acaba em aterros sanitários, só em 2016 cerca de 45 milhões de toneladas de lixo eletrônico (*e-waste*) foram descartados em todo o mundo.

Nós também podemos citar os estudos de Yazdani, Gonzalez e Chatterjee (2019) sobre Economia Circular e a tomada de decisão na agricultura, Kirchherr *et al.* (2018) sobre as barreiras para implementação na Economia Circular na União Europeia, Hussain e Malik (2020) sobre uma cadeia de suprimentos circular demonstram uma mudança no paradigma de operações ao redor do mundo. Assim, pode-se perceber uma mudança de pensamento e, conseqüentemente, nas decisões e ações com relação aos sistemas de produção e consumo. Outro ponto importante é integrar mudanças na sociedade como a adoção das tecnologias da indústria 4.0. Estudos como os de Bag *et al.* (2021) e Ma (2020) apontam que a Indústria 4.0 permite melhorar a sustentabilidade ao associar suas tecnologias às estratégias e princípios da Economia Circular. Portanto, é preciso também incorporar novas tecnologias que deem subsídios para este movimento em direção ao planeta mais sustentável com base na adoção de uma economia circular. Neste contexto de tecnologias da indústria 4.0 e Economia Circular este artigo visa contribuir com uma melhor compreensão de sua inter-relação.

3. METODOLOGIA

O presente estudo fundamenta-se em uma pesquisa exploratória e de caráter qualitativo. Para tanto, foram selecionados artigos científicos na base Scopus buscando o estado atual das discussões sobre a inter-relação entre Indústria 4.0 e Economia Circular. Assim, no intuito de promover uma melhor compreensão do fenômeno estudado foi adotado como método a Revisão Sistemática de Literatura (RSL). Os procedimentos aplicados em uma RSL permitem investigar de forma robusta e com rigor para entender com maior profundidade o fenômeno analisado (Tranfield *et al.*, 2003).

Para este estudo vale explicitar que a adoção da RSL se dá porque ela se difere das tradicionais revisões narrativas que usam a literatura de forma conveniente. Assim, por adotar um processo científico sistemático que é replicável e transparente, esta pesquisa permite a replicação de suas etapas. Neste mesmo sentido, a RSL se justifica por ela mitigar o viés oculto na construção de um quadro teórico sobre determinado tema, deixando claro quais foram às escolhas dos pesquisadores, além de possibilitar a construção de uma trilha de auditoria das decisões e procedimentos aplicados (Cook *et al.*, 1997). Ainda sobre a RSL, ela também é uma alternativa à estudos bibliométricos porque ela tem um viés mais qualitativo, pois são aplicados procedimentos de análise de conteúdo por meio da categorização do corpus de pesquisa com base numa leitura crítica e reflexiva mais atenta para realizar agrupamentos.

Vale destacar que os procedimentos aqui aplicados seguiram as prescrições de Pollock e Berge (2008) para a realização de uma RSL. Os procedimentos foram divididos em seis fases (Pollock & Berge, 2018), sendo elas: (i) esclarecer metas e objetivos de pesquisa; (ii) buscar pesquisas relevantes; (iii) coletar dados; (iv) avaliar a qualidade dos estudos; (v) sintetizar as evidências; (vi) interpretar os achados. As fases e atividades aqui apresentadas visam garantir o rigor e a robustez que se objetivam neste tipo de pesquisa.

A primeira fase foi motivada pelo objetivo que norteia esta pesquisa, que foi “analisar como a inter-relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e Economia Circular influência na sustentabilidade”. Para tanto, reforça-se que foi utilizada a base de dados Scopus para esta pesquisa, sendo esta uma das principais bases de dados para acesso às pesquisas publicadas na área de produção, sustentabilidade, gestão, entre outras. Para a seleção dos artigos foi

considerado o período de 2015 a 2021 e os termos de busca foram: “*Industry 4.0*” AND “*Circular Economy*”.

Vale destacar que ao pesquisar na Scopus isoladamente “*Industry 4.0*” e “*circular economy*” foram encontrados respectivamente 3803 e 5643 artigos. Quando foi realizada uma busca associando esses dois termos em uma única *string*, obtém-se apenas 93 trabalhos. Então, os resultados foram extraídos da base de dados Scopus e os arquivos passaram por análise com o uso de ferramentas tecnológicas como planilhas de Excel. Assim, a partir da seleção dos artigos, foram analisados inicialmente os títulos e abstracts dos resultados com o intuito de identificar quais artigos apresentavam aderência à pesquisa proposta.

Na seção de resultados e discussão, são apresentadas as principais contribuições deste trabalho de maneira sistematizada, discutindo os principais temas desta pesquisa e a relevância teórica dos materiais analisados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a fase de seleção e análise dos artigos, foi possível compreender alguns aspectos relevantes sobre a inter-relação da Indústria 4.0 e a Economia Circular. Neste sentido, Rosa *et al.* (2020) citam que as tecnologias da Indústria 4.0 que contribuem para a Economia Circular mais citadas pela bibliografia são o *Big Data* e *analytics*, a Internet das Coisas e a manufatura aditiva.

Como principais facilitadores, a Internet das Coisas e o *Big Data* e *analytics* permitem especialmente a coleta e compartilhamento de dados em tempo real, fundamentais para otimizar a exploração de recursos ambientais, facilitar a logística (inclusive a reversa) e viabilizar a simulação de processos produtivos e reinserção de resíduos no sistema de produção (Rosa *et al.*, 2020). Assim, uma atividade que contribui para práticas de Economia Circular é a simulação, pois ela colabora na gestão de cadeias de suprimento, tornando possível adaptar melhor a oferta e a demanda entre fornecedores e clientes, além de ajudar na racionalização do consumo de recursos (Bag *et al.*, 2021; Dev *et al.*, 2019; Jabbour *et al.*, 2018; Rosa *et al.*, 2020). Vale ressaltar que o sistema de *Digital Twin* é o método mais utilizado de simulação para a modelagem e troca de dados (Rosa *et al.*, 2020). O *Digital Twin* consiste na representação

virtual de um produto combinado a *analytics* com objetivo de uma melhor tomada de decisão em cenários complexos de produção (Kristoffersen *et al.*, 2020).

A manufatura aditiva foi um tópico relevante neste estudo, apesar de Angioletti *et al.* (2016) e Kellens *et al.* (2017) a apontarem como uma das tecnologias atuais mais revolucionárias, no levantamento realizado para elaboração deste trabalho, poucos artigos explicam detalhadamente seus impactos e sua implementação para a Economia Circular. De modo geral, a manufatura aditiva está associada à redução de custos, tempo de produção e consumo de matéria prima, pois não exige o uso de ferramentas, gabaritos e demais acessórios (Jabbour *et al.*, 2018; Nascimento *et al.*, 2018). Além disso, a manufatura aditiva também traz a possibilidade de customização de produto, viabilizada pela conectividade entre designers, engenheiros e usuários, pois também permite a reutilização e a reciclagem (Dev *et al.*, 2019; Jabbour *et al.*, 2018). Vide exemplo mencionado na Tabela 2.

A Internet das Coisas é vista como uma das tecnologias mais importantes para apoiar a transição para uma Economia Circular para considerável parte da literatura como aponta Rosa *et al.* (2020), pois ela é relacionada com diversas estratégias de Economia Circular – seja ao permitir a geração e compartilhamento de dados de processos, organizações e clientes (Jabbour *et al.*, 2018); ao diminuir o consumo energético e otimizar a utilização de equipamentos (Ma *et al.*, 2020); ou racionalizar o uso de recursos na gestão de cadeias de suprimento (Dev *et al.*, 2019).

Por fim, sistemas ciberfísicos representaram a tecnologia menos discutida na perspectiva de contribuição para a Economia Circular, no entanto, destaca-se que há mais clareza de como a tecnologia apoia estratégias de Economia Circular (Rosa *et al.*, 2020). Os benefícios dos sistemas ciberfísicos estão no melhor gerenciamento do ciclo de vida de produtos e no desenvolvimento de novos serviços, especialmente por motivos de manutenção (Dev *et al.*, 2019; Jabbour *et al.*, 2018; Rosa *et al.*, 2020). No contexto dos estudos que contemplam o conceito de ciberfísico, vale destacar que uma lacuna de entendimentos que oportuniza novos estudos. A integração do Twin Digital, Internet das Coisas, entre outros, à Economia Circular demonstra a sua evidência, mas não sua consolidação.

Na literatura consultada fica evidente que a inter-relação da Indústria 4.0 com a Economia Circular corrobora positivamente para a sustentabilidade na perspectiva do *triple*

bottom line. Conforme alguns especialistas descrevem, as tecnologias da Indústria 4.0 sustentam e facilitam a implementação de estratégias de produção mais limpa, gestão sustentável das operações e de Economia Circular (Bag *et al.*, 2021; Chauhan *et al.*, 2021; Dev *et al.*, 2019; Jabbour *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2020; Nascimento *et al.*, 2018; Okorie *et al.*, 2018). Mais especificamente, pode-se dizer que a Indústria 4.0 potencializa as iniciativas de Economia Circular, pois:

- i. os dados gerados e compartilhados por meio de tecnologias da Indústria 4.0 permitem tomar melhores decisões quanto a estratégias de Economia Circular, pois aumentam a capacidade de planejar e prever a produção, economizando recursos (Dev *et al.*, 2019);
- ii. chips, sensores RFID, sistemas ciberfísicos e sistemas de *Digital Twin* geram e compartilham dados que permitem otimizar processos industriais, de logística e o planejamento da produção, resultando na economia de recursos; possibilitam também a customização de produtos, que impacta diretamente na satisfação do usuário (Dev *et al.*, 2019);
- iii. *big data, analytics* e sistemas ciberfísicos permitem gerar e processar dados de peças e produtos. Isso possibilita buscar por avarias ou defeitos, permitindo a sua reutilização para a remanufatura e condicionamento (Jabbour *et al.*, 2018). Na perspectiva de indústrias intensivas em energia, o processamento de dados permite a economia de energia com base em um melhor planejamento das operações (Ma *et al.*, 2020).
- iv. Manufatura aditiva permite a reciclagem de materiais, além de ser um processo que economiza recursos, quando comparado à usinagem, por exemplo (Dev *et al.*, 2019). A manufatura aditiva também possibilita a prototipagem de peças em larga escala e de modo ágil, economizando recursos (Jabbour *et al.*, 2018).

De modo geral, há um consenso de que tecnologias digitais melhoram a performance das empresas (Jabbour *et al.*, 2020) e já se estuda de maneira mais contundente os impactos da Indústria 4.0 em setores específicos – como o da hospitalidade, de serviços, da indústria têxtil e da logística (Okorie *et al.*, 2018). No entanto, especialistas apontam que ainda há poucos estudos integrando a Indústria 4.0 e a Economia Circular (Okorie *et al.*, 2018; Rajput & Singh, 2019; Tseng *et al.*, 2018).

A maioria dos artigos na literatura estudada explora integração das duas disciplinas apenas em uma perspectiva teórica (Rosa *et al.*, 2020), o que aponta necessidade de se evoluir quanto à práxis no assunto. Os trabalhos que focam na parte prática normalmente focam em uma empresa ou processo específico, o que dificulta a extrapolação das estratégias de integração da Indústria 4.0 e Economia Circular para setores industriais em geral (Rosa *et al.*, 2020).

Na elaboração deste trabalho verificou-se que considerável parte dos trabalhos foca no estabelecimento de *roadmaps* e frameworks para a integração teórica e/ou prática das duas disciplinas para as empresas, academia e governos. Alguns autores inclusive aproveitam de modelos já existentes, como o Resolve da Fundação Ellen MacArthur, para propor diretrizes para implementação de tecnologias da Indústria 4.0, avaliando a sinergia e os impactos dessa integração. Para uma melhor compreensão da evidência supracitada é apresentado na Tabela 2 o modelo ReSOLVE e sua integração com algumas das tecnologias da Indústria 4.0.

Tabela 2

Modelo ReSOLVE e sua integração às tecnologias da Indústria 4.0

Ação	Descrição	Tecnologias da Indústria 4.0 que facilitam a Economia Circular	Exemplos de aplicação
<i>Regenerate</i> (regenerar)	Mudar para energia e materiais renováveis. Recuperar, conservar e regenerar a saúde dos ecossistemas. Devolver os recursos biológicos recuperados à biosfera.	Computação em nuvem, Internet das Coisas e sistemas ciberfísicos.	Equipamentos e dispositivos, conectados a sensores e aplicativos em uma rede de Internet das Coisas, podem planejar, monitorar e controlar fatores que influenciam na plantação de colheitas, por exemplo. Os dados coletados por esses equipamentos e dispositivos permitem uma melhor tomada de decisão, sugerindo a rotação de colheitas ou o racionamento no uso de pesticidas. Assim, minimizam-se os impactos ambientais das operações e se permite uma regeneração por parte dos ecossistemas.
<i>Share</i> (compartilhar)	Manter a velocidade do ciclo do produto baixa e maximizar a utilização dos produtos, compartilhando-os entre os usuários (compartilhamento ponto a ponto – P2P – de produtos de propriedade privada ou compartilhamento público de um conjunto de produtos), reutilizando-os ao longo de sua vida técnica (de segunda mão) e prolongando	Internet das coisas e sistemas ciberfísicos.	As tecnologias mencionadas permitem coletar informações sobre o comportamento dos consumidores. Por sua vez, o compartilhamento dessas informações com as empresas permite uma melhoria de um produto ou serviço, levando a sua melhor utilização e aumentando a satisfação dos clientes. Nesse sentido, sites e aplicativos são importantes plataformas para conectar pessoas às organizações. Adicionalmente, o uso de sensores em produtos permite o monitoramento de seu desempenho (ex.: monitoramento de requisitos de manutenção), possibilitando que empresas forneçam proativamente serviços aos seus clientes. Através deste monitoramento, as empresas podem também investir na extensão da vida útil dos produtos.

Ação	Descrição	Tecnologias da Indústria 4.0 que facilitam a Economia Circular	Exemplos de aplicação
	sua vida através da manutenção, reparo e <i>design</i> para durabilidade.		
<i>Optimize</i> (otimizar)	Aumentar o desempenho/eficiência de um produto. Remover resíduos na produção e na cadeia de suprimento (desde o abastecimento e logística até a produção, uso e coleta no final do uso).	Internet das coisas e sistemas ciberfísicos	A otimização de processos não é recente e tem origem com a produção enxuta, popularizada pela Toyota. Tanto o desempenho como a eficiência podem ser melhorados com o apoio de sistemas ciberfísicos e da Internet das Coisas. Essas tecnologias possibilitam coletar dados de processos e máquinas, permitindo identificar falhas e oportunidades de melhoria, seja em processos industriais ou na logística de um produto. Com base em dados reportados em tempo real sobre as condições de processos industriais ou de logística, intervenções podem ser programadas de maneira mais assertiva para corrigir ou melhorar esses processos, evitando uso excessivo ou desperdício de recursos (ex.: tempo, energia etc.).
<i>Loop</i> (“ciclar”)	Manter os componentes e materiais em circuitos fechados e priorizar os circuitos internos. Para materiais finitos, isso significa a remanufatura de produtos ou componentes e, como último recurso, a reciclagem de materiais. Para materiais renováveis, digestão anaeróbica e extração bioquímica de resíduo orgânico.	Computação / produção em nuvem, Internet das Coisas e sistemas ciberfísicos	<i>Chips</i> , sensores, códigos QR ou de barras em produtos informam os usuários e empresas sobre os componentes, materiais e estado de um produto, maquinário ou equipamento e como eles podem ser desmontados e reciclados no final da vida útil, facilitando ciclos de Economia Circular. A logística e a logística reversa podem melhorar seus processos através da coleta e processamento de dados coletados com a Internet das Coisas, pois bens de pós-consumo e embalagens podem ser rastreados usando sensores, RFID e códigos QR ou de barras

Ação	Descrição	Tecnologias da Indústria 4.0 que facilitam a Economia Circular	Exemplos de aplicação
<i>Virtualise</i> (virtualizar)	Entregar a experiência virtualmente – livros ou músicas em mídia virtual, compras online, frotas de veículos autônomos e escritórios virtuais.	Computação / produção em nuvem, Internet das Coisas e manufatura aditiva	A computação / produção em nuvem bem como a Internet das Coisas permite a conexão entre organizações, fornecedores e clientes, a fim de oferecer serviços ao invés de produtos físicos. Como o foco deve ser na entrega da experiência, as tecnologias mencionadas são aplicadas para coletar informações sobre o comportamento dos consumidores, assim, organizações podem usá-las para melhorar o design de seus serviços. Nessa perspectiva, o rastreamento de entrega é um importante serviço para aprimorar a experiência dos clientes. Adicionalmente, vale ressaltar que há empresas que conseguem fabricar produtos customizados usando impressoras 3D a partir da interação entre organizações e clientes.
<i>Exchange</i> (trocar)	Substituir materiais obsoletos por materiais avançados. Optar por novas tecnologias, produtos e serviços.	<i>Big data, analytics, Internet das Coisas e manufatura aditiva</i>	Produtos aliados a uma rede de Internet das Coisas, <i>big data, analytics</i> e sistemas ciberfísicos permitem reunir dados para a substituição e o condicionamento de peças e produtos. Isso torna a remanufatura e a logística reversa mais eficientes e sustentáveis. Um <i>case</i> é o trabalho desenvolvido pela <i>Caterpillar</i> (2021) na remanufatura e condicionamento de peças e equipamentos. A adoção da impressão 3D como uma nova tecnologia pode contribuir para Economia Circular, pois é capaz de reduzir o consumo de recursos (quando comparada a métodos tradicionais, por exemplo, a usinagem na fabricação de uma peça para um equipamento). Um <i>case</i> é o de uma empresa chinesa capaz de produzir 10 casas de concreto reciclado no período de 24 horas – redução em tempo, mão de obra e matéria prima. ¹

Fonte: elaborado pelos autores com base em Dev *et al.* (2019), Fundação Ellen MacArthur (2015a) e Jabbour *et al.* (2018)

Esses *roadmaps* e *frameworks* são importantes para priorizar iniciativas, definir metas, facilitar análises de lacunas e criar uma linguagem comum para entre duas disciplinas diferentes

¹ <https://www.designboom.com/technology/3d-printed-houses-in-24-hours-04-24-2014/>

(Kristoffersen *et al.*, 2020). Cabe destacar que durante a elaboração deste artigo verificou-se que se carece de aplicações práticas e *cases* reais para exemplificação melhor de como se dá a operacionalização e integração Indústria 4.0 e Economia Circular.

A Tabela 3 apoia as conclusões deste estudo, além de sintetizar os artigos consultados que correlacionam Indústria 4.0 e Economia Circular. A tabela resume também os elementos da Indústria 4.0 mencionados e abordados pelos autores e descreve como os trabalhos colaboram para a consolidação das duas disciplinas.

Tabela 3
Síntese da literatura consultada

Ano	Autor	Elementos mencionados pelos autores						Como os autores contribuem para integração da Indústria 4.0 com a Economia Circular?
		Big data e analytics	Computação em nuvem	Digital Twin (simulação)	Internet das coisas	Identificação por radiofrequência	Manufatura aditiva (impressão 3D)	
2021	Bag <i>et al.</i>	X	X		X		X	Através de uma análise cruzada de modelos teóricos, questionários de pesquisa e análises estatísticas, os autores verificaram que um alto nível de implementação da Indústria 4.0 permite o desenvolvimento de capacidades de fabricação avançada baseadas na escada 10R de Jacqueline Cramer. Verificaram também que essas capacidades de fabricação avançada têm uma influência positiva em relação ao desenvolvimento sustentável.

2021	Chauhan <i>et al.</i>				X	X		X	Os autores propõem 7 critérios de excelência para a operação de um sistema inteligente de destinação de resíduos hospitalares que retenha o máximo de material e valor dentro do ciclo, enquanto minimiza os danos ao ambiente e às pessoas. Esses critérios foram definidos combinando elementos da Indústria 4.0 e da Economia Circular.
2020	Kristoffersen <i>et al.</i>	X	X	X	X			X	Propõem um detalhado <i>framework</i> para o setor industrial integrar a Indústria 4.0 com a Economia Circular e, assim, desenvolver o potencial de estratégias circulares que melhorem a eficiência em consumo de recursos e a produtividade. A elaboração deste <i>framework</i> se baseou no cruzamento de literatura e exemplos teóricos e reais de estratégia circulares.
2020	Ma <i>et al.</i>	X	X	X	X	X		X	Os autores descrevem que tecnologias da Indústria 4.0 como o <i>big data</i> e <i>analytics</i> propiciam oportunidades para implementação de estratégias de produção mais limpa e Economia Circular. Os avanços na coleta e uso de dados auxiliam na tomada de decisão, permitindo uma melhor circularidade da energia e de recursos nos processos industriais especialmente nas indústrias intensivas em energia, objeto do estudo.
2020	Rosa <i>et al.</i>	X	X	X	X	X	X	X	Fazem uma extensa e sistemática revisão da literatura publicada até 2020, estabelecendo relações entre as tecnologias da Indústria 4.0 e elementos da Economia Circular. O resultado é um conjunto específico de correlações das duas disciplinas que detalha a operacionalização e exemplos teóricos e reais.
2019	Dev <i>et al.</i>		X		X	X	X	X	Propõem um <i>framework</i> para eficiência operacional em indústrias, considerando a integração de tecnologias da Indústria 4.0 com estratégias de Economia Circular orientadas à Logística Reversa a partir do modelo ReSOLVE. O estudo propõe um arranjo de um sistema ERP habilitado para RFID e baseado em nuvem que permite o retorno de produtos, explorando a simulação extensiva de logística reversa que corrobora para o componente de fábrica virtual da Indústria 4.0. Nesse <i>framework</i> , estratégias de Economia Circular são sustentadas por recursos de compartilhamento de informações da Indústria 4.0.

2019	Kerin Pham &	X	X	X	X	X	X	X	Fazem uma revisão de trabalhos publicados sobre Indústria 4.0, explorando especialmente os efeitos da Internet das Coisas, realidade virtual e realidade aumentada na manufatura. Sob uma perspectiva de criação de valor, discutem tendências e lacunas da aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 na manufatura em quatro aspectos: produto, equipamento, processo e organização.
2018	Jabbour <i>et al.</i>	X	X		X	X	X	X	Discutem o <i>framework</i> ReSOLVE à luz das tecnologias da Indústria 4.0, propondo um <i>roadmap</i> para a integração prática das duas disciplinas. Descrevem que as tecnologias da indústria 4.0, ao integrarem melhor as cadeias de valor por meio da coleta e compartilhamento de dados, contribuem com as decisões da gestão sustentável das operações e com novos modelos de negócios (em especial, os circulares). Adicionalmente esclarecem que as decisões da gestão sustentável das operações contribuem para a implementação entre os princípios da Economia Circular e as abordagens da Indústria 4.0.
2018	Nascimento <i>et al.</i>	X	X	X	X			X	Os autores discutem um <i>framework</i> para um possível modelo de negócio focado no reuso e na reciclagem de resíduos eletroeletrônicos que se aproveita das tecnologias da Indústria 4.0. Concomitantemente, os autores exploram a integração da Indústria 4.0 com a Economia Circular. Discutem, por exemplo, como as tecnologias da Indústria 4.0 podem apoiar na gestão de dados e, como os sistemas de informação, por sua vez, podem ajudar no rastreamento de materiais, facilitando pontos de coleta para reuso e reciclagem.
2018	Okorie <i>et al.</i>	X	X		X	X		X	A partir de uma revisão sistemática da literatura de 2000 a 2018, os autores propõem um <i>framework</i> para integração da Economia Circular com as tecnologias digitais da Indústria 4.0. Os autores também resumem as atuais tendências da Economia Circular, indicando inclusive sua atual problematização como paradigma. O objetivo do artigo é oferecer orientações para formuladores de políticas e orientação para pesquisas futuras por meio de uma revisão dos campos integrados de Economia Circular e Indústria 4.0.

Fonte: elaborado pelos autores (2021).

Por fim, deve-se notar que, apesar da literatura pesquisada apresentar certo entusiasmo com relação à integração da Indústria 4.0 com a Economia Circular e, inclusive, a última ser

citada como uma das melhores soluções para o desenvolvimento sustentável (Ma *et al.*, 2020), é importante estudar os dois temas com cautela. Especialistas apontam que a Economia Circular é frequentemente criticada por negligenciar questões sociais e éticas por apenas focar no equilíbrio ambiental e econômico. Além disso, também é uma questão não definir claramente como a Economia Circular levará a uma maior igualdade social em termos de gerações, gênero, etnia e outras diversidades (Ma *et al.*, 2020). Inclusive, segundo Okorie *et al.* (2018) os últimos avanços no campo da Economia Circular vêm questionando o conceito como paradigma e sua relação com a sustentabilidade e outros conceitos.

Apesar dos questionamentos aqui apontados, deve-se ressaltar que a Economia Circular continua sendo um relevante e promissor conceito, pois tem a capacidade de atrair as empresas para trabalhar em prol do desenvolvimento sustentável. Nesta mesma linha pode-se ainda dizer que a Economia Circular é capaz de: (i) destacar a importância dos ciclos de materiais de alto valor e alta qualidade de uma nova maneira e (ii) mostrar as possibilidades da economia compartilhada ao lado da produção sustentável para uma cultura de produção-consumo mais sustentável (Korhonen *et al.*, 2017). Nesse sentido, talvez, a integração das tecnologias da Indústria 4.0 às práticas de Economia Circular possam representar um novo paradigma para a sociedade em geral, principalmente, em termos de melhorar os aspectos relacionados à sustentabilidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste estudo é possível compreender que a inter-relação da Indústria 4.0 e Economia Circular é evidente, embora muito ainda tenhamos que avançar para aproveitar essa profícua intersecção. Assim, como foi constatado as tecnologias da Indústria 4.0 facilitam e sustentam a produção mais limpa, a gestão sustentável das operações e a Economia Circular. Vale destacar que a relação observada é de um efeito positivo com relação à sustentabilidade.

Nós reforçamos que diversas oportunidades são obtidas da inter-relação estudada, mas ainda há diversos desafios que necessitam ser superados. O conceito de economia circular está cada vez mais difundido na sociedade, como também a adoção de tecnologias da Indústria 4.0. O problema é desenvolver formas de integrá-los para obter soluções para uso de recursos,

reinscrição de resíduos em sistemas de produção e consumo e uma melhor gestão do fluxo de materiais e seus subprodutos. A visão baseada na circularidade dos recursos deve ser suportada pelas tecnologias. Como apresentado nos artigos, a simulação de fluxo de materiais em sistemas que incorporem *machine learning*, computação em nuvem e big data e analytics permitem modelar sistemas mais ecoeficientes.

Neste sentido, este estudo verificou ainda que essa correlação não é somente conceitual, mas também prática. Isso foi verificado ao sistematizar artigos publicados nos últimos anos e ao explorar a integração das duas disciplinas com base no modelo ReSOLVE da Fundação Ellen MacArthur – os resultados são as Tabelas 2 e 3. Assim, ao aprofundar nos estudos sobre Indústria 4.0 e Economia Circular de forma conjunta, verificou-se que há necessidade urgente de se desenvolver ambas as disciplinas pela academia e empresariado brasileiros. A maior preocupação com estas duas temáticas se dá por serem ainda explorados de forma incipientes no país. Os benefícios não são somente de avanços na discussão, mas na busca de soluções para uso consciente dos recursos e equilíbrio entre os ciclos técnicos e biológicos.

Na elaboração deste trabalho constatou-se também um enfoque muito grande da literatura em estabelecer e definir *roadmaps* e *frameworks*, e que, talvez, os estudos devessem avançar em direção às aplicações práticas e *cases* reais para exemplificação melhor de como se dá a operacionalização e integração das disciplinas. A proposta não é somente estimular discussão teóricas sobre a inter-relação, mas aprofundar propostas que permitam desenvolver soluções para gestão dos recursos por meio da incorporação de sensorização com internet das coisas e simulações com *digital twin* e todas as tecnologias que as suportam.

Não obstante os resultados apresentados, para finalizar, deve-se ressaltar que este estudo apresenta diversas limitações. Por se tratar de um estudo baseado apenas na consulta à literatura, não houve demonstrações práticas da integração da Indústria 4.0 e da Economia Circular. Nesta mesma linha, a literatura pesquisada apresenta boa parte dos exemplos de integração das duas disciplinas com exemplos teóricos e não práticos, o que dificulta o entendimento de como seria a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 no mundo real.

Com base no que foi supracitado, a proposta de estudos futuros deve contemplar relatos e casos práticos da aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 para fomentar uma Economia

Circular efetiva. Como pode ser evidenciada a aplicação é promissora em diversas áreas como produção, agricultura, saúde, entre outras.

REFERÊNCIAS

- Angioletti, C. M., Sisca, F. G., F G, F., Luglietti, R., Taisch, M., & Rocca, R. (2016). Additive Manufacturing as an opportunity for supporting sustainability through the implementation of circular economies. In 21st Summer School Francesco Turco 2016 (pp. 25-25). *AIDI-Italian Association of Industrial Operations Professors*. <http://hdl.handle.net/11311/1019487>
- Bag, S., Gupta, S., & Kumar, S. (2021). Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. *International journal of production economics*, 231, 107844. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107844>
- Bag, S., Gupta, S., & Kumar, S. (2021). Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. *International journal of production economics*, 231, 107844. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107844>
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes—A literature review. *Journal of cleaner production*, 259, 120856. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>
- Caterpillar (2021). *Remanufacturing: It's Bigger Than You Think*. Recuperado em 24 dezembro, 2021 em: <https://www.caterpillar.com/en/news/caterpillarNews/strategy/ar-remanufacturing.html>
- Chauhan, A., Jakhar, S. K., & Chauhan, C. (2021). The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. *Journal of cleaner production*, 279, 123854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123854>
- Chidepatil, A., Bindra, P., Kulkarni, D., Qazi, M., Kshirsagar, M., & Sankaran, K. (2020). From trash to cash: how blockchain and multi-sensor-driven artificial intelligence can transform circular economy of plastic waste?. *Administrative Sciences*, 10(2), 23. <https://doi.org/10.3390/admsci10020023>
- Circularity Gap Reporting Initiative. (2021). *The Circularity Gap Report 2021*. Recuperado em 19 julho, 2021, em: <https://www.circularity-gap.world/2021>
- Cni. *Desafios para a Indústria 4.0 no Brasil*. (2016). Recuperado em 19 julho, 2021, em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/8/desafios-para-industria-40-no-brasil/>
- Cook, D. J., Mulrow, C. D.; Haynes, R. B. (1997). Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions. *Annals of internal medicine*, v. 126, n. 5, p. 376-380. Recuperado em 20 julho, 2021. doi: <https://doi.org/10.7326/0003-4819-126-5-199703010-00006>
- de Oliveira, F. R., França, S. L. B., & Rangel, L. A. D. (2018). Challenges and opportunities in a circular economy for a local productive arrangement of furniture in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.031>
- de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Godinho Filho, M., & Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for

- sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270(1), 273-286. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10479-018-2772-8>
- DePalma, K., Walluk, M. R., Murtaugh, A., Hilton, J., McConky, S., & Hilton, B. (2020). Assessment of 3D printing using fused deposition modeling and selective laser sintering for a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121567. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121567>
- Dev, N. K., Shankar, R., & Qaiser, F. H. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104583. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104583>
- Fórum Econômico Mundial. (2020). *Global Risks Report 2020*. Recuperado em 22 maio, 2021. em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf
- Fórum Econômico Mundial. (2021). *Global Risks Report 2021*. Recuperado em 20 maio, 2021. em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf
- Fundação Ellen Macarthur. (2015a) *What is circular economy?*. 2015. Recuperado em 28 maio, 2021, em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept>
- Fundação Ellen Macarthur. (2015b). *Growth Within: A Circular Economy Vision for A Competitive Europe*. Recuperado em 28 maio, 2021, em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/circular-economy/Growth-Within-Report.pdf>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Hussain, M., & Malik, M. (2020). Organizational enablers for circular economy in the context of sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120375>
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., ... & Do Noh, S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 3(1), 111-128. <http://dx.doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R., & Duflou, J. R. (2017). Environmental dimensions of additive manufacturing: mapping application domains and their environmental implications. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S49-S68. <https://doi.org/10.1111/jiec.12629>
- Kerin, M., & Pham, D. T. (2019). A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing. *Journal of cleaner production*, 237, 117805. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117805>
- Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics*, 150, 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Kristoffersen, E., Blomsma, F., Mikalef, P., & Li, J. (2020). The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *Journal of Business Research*, 120, 241-261. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044>

- Martens, C. D. P., da Silva, L. F., Silva, D. F., & Martens, M. L. (2021). Challenges in the implementation of internet of things projects and actions to overcome them. *Technovation*, 102427. <http://dx.doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102427>
- Nascimento, D. L. M., Alencastro, V., Quelhas, O. L. G., Caiado, R. G. G., Garza-Reyes, J. A., Rocha-Lona, L., & Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 30(3), 607-627. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0071>
- Okorie, O., Saloniitis, K., Charnley, F., Moreno, M., Turner, C., & Tiwari, A. (2018). Digitisation and the circular economy: A review of current research and future trends. *Energies*, 11(11), 3009. <https://doi.org/10.3390/en11113009>
- Pearce, David W., TURNER, R. Kerry. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. JHU press.
- Pigola, A., da Costa, P. R., Carvalho, L. C., Silva, L. F. D., Kniess, C. T., & Maccari, E. A. (2021). Artificial Intelligence-Driven Digital Technologies to the Implementation of the Sustainable Development Goals: A Perspective from Brazil and Portugal. *Sustainability*, 13(24), 13669. <http://dx.doi.org/10.3390/su132413669>
- Pollock, A., Berge, E. (2018). How to do a systematic review. *International Journal of Stroke*, 13(2), 138-156, <https://doi.org/10.1177%2F1747493017743796>
- PwC - PricewaterhouseCoopers. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. Pricewaterhouse Coopers. Recuperado em 03 junho, 2021. em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Industry 4.0– challenges to implement circular economy. *Benchmarking: An International Journal*. <http://dx.doi.org/10.1108/BIJ-12-2018-0430>
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2020). Industry 4.0 model for circular economy and cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123853>
- Román-Ramírez, L. A., Powders, M., McKeown, P., Jones, M. D., & Wood, J. (2020). Ethyl lactate production from the catalytic depolymerisation of post-consumer poly (lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*, 28(11), 2956-2964. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01824-6>
- Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662-1687. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>
- Santibanez Gonzalez, E. D., Koh, L., & Leung, J. (2019). Towards a circular economy production system: trends and challenges for operations management. *International Journal of Production Research*, 57(23), 7209-7218. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1656844>
- Schwab, K. (2016). *O que é a 4ª revolução industrial – e como ela deve afetar nossas vidas*. [Entrevista concedida a] Valeria Perasso. BBC, São Paulo.
- Tranfield, D., Denyer, D., Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British journal of management*, 14(3), 207-222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

- Tseng, M. L., Tan, R. R., Chiu, A. S., Chien, C. F., & Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: can big data drive industrial symbiosis?. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 146-147. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.028>
- van Engelshoven, Y., Wen, P., Bakker, M., Balkenende, R., & Rem, P. (2019). An innovative route to circular rigid plastics. *Sustainability*, 11(22), 6284. <https://doi.org/10.3390/su11226284>
- Yazdani, M., Gonzalez, E. D., & Chatterjee, P. (2019). A multi-criteria decision-making framework for agriculture supply chain risk management under a circular economy context. *Management Decision*, 59(8), 1801-1826. <https://doi.org/10.1108/MD-10-2018-1088>