

**EXISTEM RELAÇÕES BENÉFICAS ENTRE AS TECNOLOGIAS HABILITADORAS PARA A INDÚSTRIA 4.0 E OS PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR?****ARE THERE BENEFICIAL RELATIONSHIPS BETWEEN INDUSTRY 4.0 ENABLING TECHNOLOGIES AND CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES?****¿EXISTEN RELACIONES BENEFICIOSAS ENTRE LAS TECNOLOGÍAS FACILITADORAS DE LA INDUSTRIA 4 Y LOS PRINCIPIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR?**

William Dietrich Klug<sup>1</sup>  
Bianca Rodrigues Mattoso<sup>2</sup>  
Aline Soares Pereira<sup>3</sup>  
Alejandro Martins Rodriguez<sup>4</sup>

Universidade Federal de Pelotas

<sup>1</sup> deiklug@gmail.com

<sup>2</sup> birmattoso@gmail.com

<sup>3</sup> pereira.asp@gmail.com

<sup>4</sup> aljmartins@gmail.com

**Resumo:** O desenvolvimento crescente da Indústria 4.0 e as práticas sustentáveis da Economia Circular tem a priori muito potencial de sinergia. Sendo assim, por meio de uma revisão sistemática da literatura, o objetivo deste trabalho é identificar as tecnologias associadas à Indústria 4.0 que têm sido aplicadas no âmbito da Economia Circular. Este presente trabalho adotou as etapas para Revisão Sistemática propostas por Denyer e Tranfield (2009), a citar: formulação da questão, localização de estudos, seleção e avaliação de estudos, análise, síntese e relato, e uso dos resultados. Para tanto, foram consultadas as bases de dados Scielo, Periódicos da Capes e Google Acadêmico. Logo após, os principais resultados encontrados foram organizados e descritos de acordo com as relações existentes entre os dois temas, podendo-se constatar um interesse particular por abordagens relacionadas no que se refere a Internet das Coisas (IoT), digitalização, e Big Data. Por fim, pode-se concluir que as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, contribuem com o modelo de Economia Circular. O entendimento entre Indústria 4.0 e Economia Circular trará benefícios para os setores produtivos que utilizar tal associação, através de várias possibilidades, as quais são levantadas no trabalho.

**Palavras-chave:** manufatura avançada; indústria 4.0; economia circular; sustentabilidade; remanufatura.

**Abstract:** The growing development of Industry 4.0 and the sustainable practice of the Circular Economy has a priori much potential for synergy. Thus, through a systematic review of the literature, the objective of this work is to identify the technologies associated with Industry 4.0 that have been applied in the scope of Circular Economy. This work adopted the steps for Systematic Review proposed by Denyer and Tranfield (2009), to mention: formulation of the question, location of studies, selection and evaluation of studies, analysis, synthesis, and report, and use of results. For this, three main databases were inquired: Scielo, Capes Journals and Google Scholar. Soon after, the main results found were organized and described according to the relationships between the two themes, and it can be seen a particular interest in related approaches regard to

the Internet of Things (IoT), digitization, and Big Data. Finally, it can be concluded that industry-enabling technologies 4.0 contribute to the Circular Economy model. The understanding between Industry 4.0 and Circular Economy will bring benefits to the productive sectors that use such an association through various possibilities, which are raised in this work.

**Keywords:** advanced manufacturing; industry 4.0; circular economy; sustainability; remanufacturing.

**Resumen:** El creciente desarrollo de la Industria 4.0 y las prácticas sostenibles de la Economía Circular tiene a priori mucho potencial de sinergia. Así, a través de una revisión sistemática de la literatura, el objetivo de este trabajo es identificar las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 que se han sido aplicadas en el ámbito de la Economía Circular. Este trabajo adoptó los pasos para la Revisión Sistemática propuestos por Denyer y Tranfield (2009), que consisten en: formulación de la pregunta, ubicación de los estudios, selección y evaluación de estudios, análisis, síntesis e informe, y uso de los resultados. Para ello, se consultó a las bases de datos Scielo, Capes Journals y Google Scholar. Poco después, los principales resultados encontrados fueron organizados y descritos de acuerdo con las relaciones entre los dos temas, pudiendo ser apreciado un interés particular en los enfoques relacionados con el Internet de las Cosas (IoT), la digitalización y el Big Data. Por último, se puede concluir que las tecnologías facilitadoras de la industria 4.0 contribuyen al modelo de Economía Circular. El entendimiento entre la Industria 4.0 y la Economía Circular aportará beneficios a los sectores productivos que utilizan dicha asociación, a través de diversas posibilidades, que se plantean en el trabajo.

**Palabras clave:** fabricación avanzada; industria 4.0; economía circular; sostenibilidad; remanufactura.

## 1. INTRODUÇÃO

As revoluções industriais atravessaram ao longo da história diversos marcos tecnológicos que promoveram mudanças nos sistemas de produção das máquinas, procedimentos, e formas de gestão. Até o chamado conceito de Indústria 4.0, três revoluções tinham acontecido como promotoras de mudança de paradigmas. Com a 1ª. Revolução Industrial (data de referência 1760) seguiu o período de industrialização desorganizada. Com ela vieram a máquina a vapor e a mecanização. A 2ª. Revolução Industrial (data de referência 1870) iniciou com o desenvolvimento de indústrias eletricidade, gás e petróleo, e a consequente criação do motor de combustão interna, o automóvel e a aviação comercial. Também, esta revolução está caracterizada pela produção em série, o desenvolvimento da demanda de aço, a síntese química e os métodos de comunicação, como o telégrafo e o telefone. A 3ª. Revolução Industrial (data de referência 1969) trouxe a energia, a ascensão da eletrônica, as telecomunicações, e os computadores. Esta revolução abriu as portas para a automação de alto nível, as expedições espaciais, a biotecnologia, e os robôs (SAKURAI e ZUCHI, 2018).

A indústria 4.0 começou no início do presente milênio, pelo que desconhecemos ainda sua verdadeira magnitude. A Indústria 4.0 baseia-se na integração de tecnologias de informação e comunicação, permitindo maior flexibilidade com uma melhor qualidade de gerenciamento, além de viabilizar a geração de novas estratégias e modelos de negócio (SACOMANO, et al., 2018). O termo Indústria 4.0 tem como conceito abrangente, a cadeia de valor de uma organização, permeando tecnologias, sistemas e processos, os quais permitirão atender a customização em massa por intermédio da flexibilidade em seus projetos, gerando impactos estruturais por meio de melhorias (WANG, et al., 2017).

A Indústria 4.0, também gerou questões relacionadas ao meio ambiente, cuja discussão data na década de 1960. Podemos citar dois marcos importantes que deram início a questões relacionadas ao meio ambiente, sendo um a publicação do livro Primavera Silenciosa de Rachel Carson em 1962, que alarmou para os impactos do uso de químicos no pós-guerra, e o outro, o livro Estocolmo, em 1972, que fortaleceu a consciência pública quanto aos impactos ambientais (POTT, ESTRELA, 2017).

Os impactos negativos causados pelo homem na natureza tornaram-se cada vez mais evidentes. A poluição, o acúmulo de resíduos sólidos e a diminuição rápida da biodiversidade e dos recursos naturais é uma das maiores preocupações da atualidade. Todos estes fatores tornam evidente a necessidade de soluções emergentes que apresentem maneiras de reverter esse quadro. A extração de recursos naturais não renováveis, que ocorre na indústria de transformação, é uma das ações que mais danificam a atmosfera, impactando negativamente o meio ambiente. Além disso, os impactos ambientais dos produtos industriais não se restringem ao portão da fábrica (OLIVEIRA FILHO, 2013). Todo o ciclo de vida dos itens deve ser levado em consideração no processo da análise do impacto ambiental, envolvendo assim a extração da matéria prima não-renovável, o consumo de energia, o descarte e a logística reversa. Cada etapa tem um papel importante e pode ser prejudicial ao planeta se não for tratada de maneira adequada (THALES e col., 2018). Os recursos naturais disponíveis não são suficientes para suportar o atual sistema predominante de produção linear. Assim, uma vez que a indústria 4.0 torna os processos mais eficientes, e facilita o registro das informações e as comunicações, surge a seguinte questão: será que há a tecnologia em torno da indústria 4.0 poderá promover a prática do modelo econômico circular? A partir deste questionamento procuramos entender melhor a sinergia entre as tecnologias da Indústria 4.0, e a economia circular (LUCAS e col., 2019).

Neste contexto, o presente artigo tem por objetivo analisar os conceitos e os pressupostos da Economia Circular e a Indústria 4.0, trazendo fundamentos teóricos para relação entre as propostas da Indústria 4.0 com as diretrizes de Economia Circular. Tudo isso visando responder, mais precisamente, a seguinte questão: existem relações benéficas entre as práticas da Indústria 4.0 e os princípios da Economia Circular? Por fim, são apresentados os resultados e a conclusão do artigo.

## **2. REEFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Economia Circular**

O conceito de Economia Circular se contrapõe ao tradicional modelo circular. A Economia Circular, prevê a redução da dependência de recursos ao mesmo tempo em que tenta eliminar o conceito do desperdício. Produtos e serviços desse modelo são elaborados para circular de modo eficiente, com maior grau de utilização da matéria prima, menor consumo de água e de energia. O que se pretende, com este modelo, é a interligação da rede de negócios na transformação desses materiais. Assim, se certo componente de um produto não tiver utilidade na empresa que a produzir, poderá ser transformado por um terceiro, que tenha interesse. Assim novos fluxos de receitas são gerados.

A Economia Circular (WAUTELET, 2018), ou também conhecida como economia restaurativa por natureza, é um conceito que nasceu na década de 70. É um modelo diferente da “histórica” economia linear, caracterizada pela extração, transformação e descarte de resíduos. A economia circular divide-se em dois grupos de materiais, os biológicos, que tem o propósito de voltar a natureza e, os técnicos, que exigem investimentos em inovação para serem reaproveitados. O mesmo autor ainda relata que a economia circular vem se destacando em todo o mundo como forma de minimizar os impactos em relação ao modelo linear, maximizando o nível de utilidade dos materiais por meio de regeneração e restauração. O modelo conhecido como Economia Linear é caracterizado pelas seguintes etapas: i) extração de insumos; ii) produção; iii) distribuição de produtos; iv) consumo e v) descarte de rejeitos e produtos que não são mais utilizados.

O conceito de Economia Circular tem a concepção de manter em condições o valor dos recursos extraídos e produzidos em circulação por meio de cadeias produtivas integradas. O destino de um material deixa de ser um problema de gerenciamento de resíduos e, passa ser parte do processo de design de novos produtos e sistemas. A Economia Circular

tem como objetivo aumentar a eficiência do uso de recursos, com foco nos resíduos urbanos e industriais, para atingir um bom equilíbrio e harmonia entre economia, meio ambiente e, sociedade (WEBSTER,2015).

Definindo o conceito de Economia Circular, Kirchherr et al. (2017, p. 224) estabelecem que:

“Uma economia circular descreve um sistema econômico que é baseado em modelos de negócio que substituem o conceito de “fim da vida” por redução, alternativamente, reutilizando, reciclando e recuperando materiais em processos de produção/distribuição e consumo, portanto operando no nível micro (produtos, empresas e consumidores), no nível intermediário (parques eco industriais) e no nível macro (cidade, região, nação e além), com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável, o que implica na criação de qualidade ambiental, prosperidade econômica e equidade social, para benefício das gerações atual e futuras.”

A Figura 1 apresenta a relação entre os sistemas utilizados atualmente e o proposto pela economia circular.

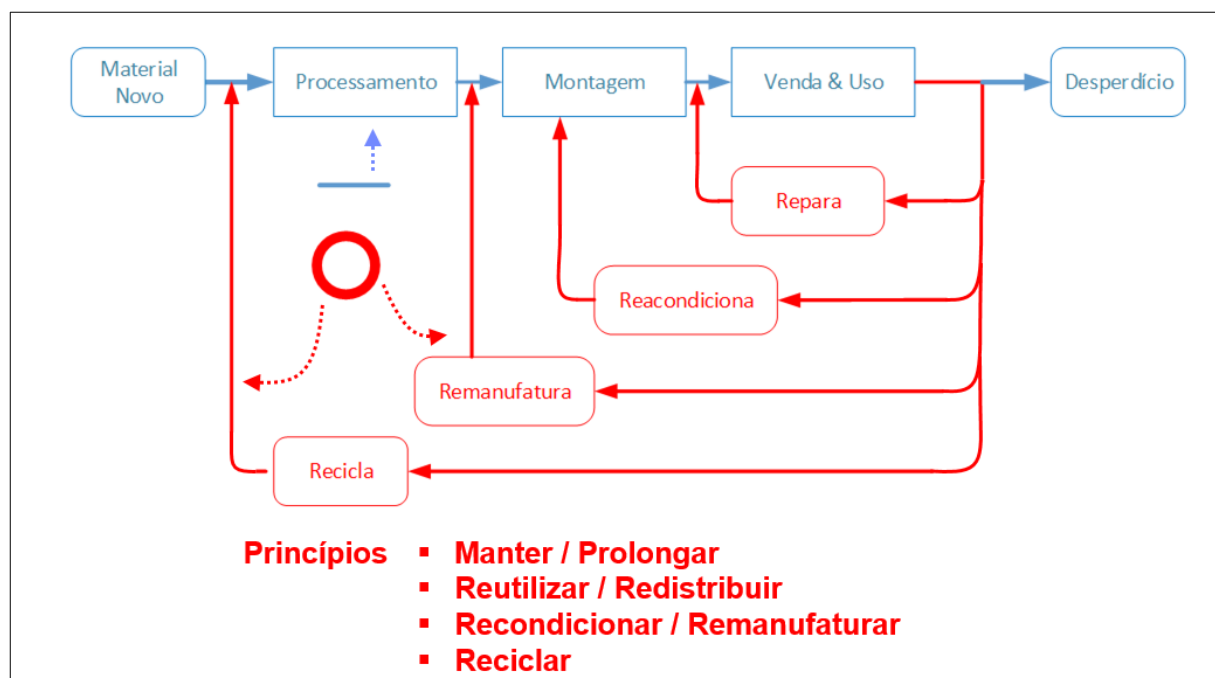


Figura 1 - Economia Linear x Economia Circular  
Fonte: Elaborada pelos autores.

A Economia Circular é um modelo econômico que tem o seguinte propósito:

- (I) Preservar e aprimorar o capital natural, selecionando recursos com sensatez, priorizando recursos renováveis e buscando a regeneração;
- (II) Otimizar o rendimento de recursos, mantendo o maior nível de

utilidade dos materiais o tempo todo;

(III) Estimular a efetividade do sistema, excluindo externalidades negativas.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2020) a população consome mais de 30% dos recursos naturais que o planeta é capaz de produzir, impossibilitando assim a chance de se regenerar.

No Mundo, somente 9% da economia é circular, o que na prática equivale a afirmar que das 92,8 bilhões de toneladas de resíduos que geramos em nossas indústrias e nas nossas casas, menos de 10% voltam para a cadeia produtiva, ou, em outras palavras, mais de 80 bilhões de toneladas de plásticos, combustíveis fósseis, biomassa etc. são destinados de forma inadequada no meio ambiente prejudicando a qualidade ambiental dos diversos ecossistemas e, conseqüentemente, afetando o equilíbrio do planeta (ONU, 2019).

Logicamente que a produção e o consumo são impulsionadores da economia, e substituir insumos nocivos ao meio ambiente é sempre desejável. Entretanto, produzir e consumir de maneira responsável é um ato de cidadania acima de tudo, e envolve novas formas de pensar produtos e serviços, inovando em soluções de menor impacto ambiental e maior valor social.

Nesse mesmo sentido, surge o modelo econômico da fundação Ellen MacArthur Foundation (EMF), pesquisadores da fundação defendem que o sistema de produção atual que visa "extrair, produzir, desperdiçar" está atingindo seus limites físicos. A economia circular é uma alternativa atraente que busca redefinir a noção de crescimento, com foco em benefícios para toda a sociedade. Isto envolve dissociar a atividade econômica do consumo de recursos finitos, e eliminar resíduos do sistema por princípio. Apoiada por uma transição para fontes de energia renovável, o modelo circular constrói capital econômico, natural e social. O modelo se baseia em três princípios: eliminar resíduos e princípios desde o princípio, manter produtos e materiais em uso e regenerar sistemas naturais. Uma economia circular busca reconstruir capital, seja ele financeiro, manufaturado, humano, social ou natural. Isto garante fluxos aprimorados de bens e serviços. O diagrama sistêmico ilustra o fluxo contínuo de materiais técnicos e biológicos através do "círculo de valor" (EMF, 2021).

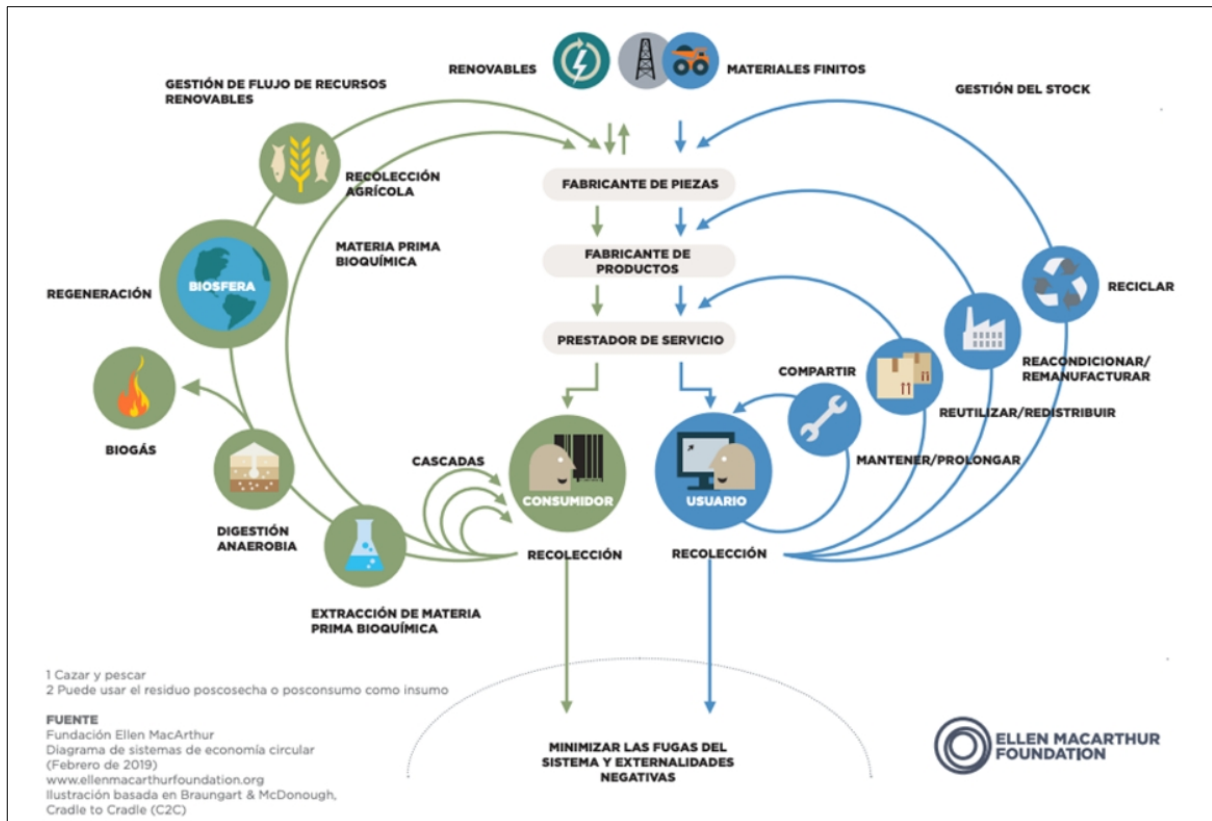


Figura 2 - Diagrama Sistêmico da Economia Circular  
Fonte: Ellen MacArthur Foundation (EMF), 2021.

A sustentabilidade ambiental requer que as empresas adotem maneiras inovadoras de produzir, considerando as atuais demandas sociais e ambientais. Nessa perspectiva, os bens e serviços precisam ser desenvolvidos, fabricados e fornecidos considerando tais condições (Motta, 2016).

Posta esta realidade e as expectativas relativas à mesma, a proposta de uma economia circular em contraponto a atual economia linear, parece contemplar e atender às novas demandas no que tange, principalmente, às questões ambientais, voltadas à integração com o econômico e social. Essas três dimensões, ambiental, social e econômica, precisam atuar de maneira simultânea para caracterizar o desenvolvimento da empresa como sustentável, embora cada uma delas tenha uma direção e uma influência que contribui para o processo.

As dimensões ambientais e sociais impactam diretamente a qualidade, a diferença da dimensão econômica que tem o reflexo acentuado, também, na própria eficiência (Liu et al., 2019). Com isso, é possível organizar um fluxo das atividades econômicas proporcionando a identificação informacional e a manutenção do sistema de economia circular para facilitar a medição da influência das dimensões do

desenvolvimento sustentável (Huang, Xia, Yu, & Zhang, 2018).

## **2.2 Indústria 4.0**

A indústria 4.0 representa um crescente avanço através de diversas tecnologias consideradas pilares, e moldarão o padrão 4.0 (ESTÉVEZ, 2016). Como já abordado, a Indústria 4.0 vem sendo tratada como a 4ª Revolução Industrial pelo fato da inovação tecnológica ser o ponto de partida para romper com os velhos paradigmas e remodelar drasticamente os sistemas de produção.

Esta revolução deu início em 2011 quando o governo alemão apresentou na Feira de Hannover uma série de estratégias voltadas à tecnologia capazes de remodelar a organização das cadeias de valor globais mediante o surgimento de “fábricas inteligentes” (BUHR, 2017; DRATH; HORCH, 2014; SCHWAB, 2016).

Desde sua apresentação na feira comercial de Hannover, o termo Indústria 4.0 tem cativado pesquisas sobre o futuro da manufatura e modificado o plano de investimento em diversos países. Com isso a Acatech (German Academy of Science and Engineering), uma das primeiras entidades que pesquisou sobre o assunto, coloca que o tema Indústria 4.0 apresenta uma nova visão. Esta visão, embora impulsionada pela disponibilidade de tecnologias, possibilita resolver problemas considerados insolúveis e tem a necessidade de ser modelada para diversas realidades locais e culturais (PFEIFFER, 2017).

Em termos de tecnologias, Indústria 4.0 é o produto de uma profusão de tecnologias inovadoras aplicadas ao meio ambiente de produção. Entre elas, podemos citar, os Cyber-Physical (CPS), a Internet of Things (IoT), a Internet of Services (IoS), inteligência artificial, Big Data, nano materiais e nano sensores (SCHWAB, 2016; CNI, 2016; BCG, 2015 a).

As transformações que a Indústria 4.0 promove apresentam potencial para aumentar a flexibilidade, a velocidade, a produtividade e a qualidade dos processos de produção (BCG, 2015 a). Os impactos resultantes dessa transformação, afetarão a economia, as empresas, os governos, as pessoas, a sociedade e o trabalho (SCHWAB, 2016)

A Indústria 4.0 combina estas diversas tecnologias para levar a indústria a um novo patamar de competitividade, associando a economia de tempo, prevenção contra panes, reduzindo os custos, maior eficiência no uso de recursos e melhor controle de qualidade, oferecendo produtos customizados, mais modernos e competitivos. Desta forma, apresenta-se um desafio para a Indústria 4.0, que é o desenvolvimento colaborativo da cadeia de suprimentos para que ela se torne sustentável (WANG, et



al.,2016).

### **3. Método de Pesquisa**

Este presente trabalho adota as etapas para Revisão Sistemática propostas por Denyer e Tranfield (2009), a citar: formulação da questão, localização de estudos, seleção e avaliação de estudos, análise, síntese e relato, e uso dos resultados.

A questão de pesquisa adotada é: “Existem relações benéficas entre as práticas da Indústria 4.0 e os princípios da Economia Circular?” Visando relacionar os dois termos, foi feita uma busca nas bases de periódicos Scielo, Periódicos da Capes (em geral) e, no Google Acadêmico. Nesta busca, foram procurados artigos que trouxessem a conceituação dos termos em primeiro momento e, em segundo momento, buscou-se artigos que relacionassem os termos. Foram utilizados somente estes portais para a busca de periódicos, pela sua amplitude, e dado o atual contexto da pandemia covid-19.

Como critério de seleção dos artigos nos portais utilizados, em um primeiro momento foi utilizado o critério de artigos que estivessem entre os anos de 2011 a 2021. Neste período é abordado o termo Indústria 4.0, e assim pode ser comentado sobre a sua relação com outros termos. Também se deu preferência em um segundo momento por artigos que estivessem escritos na língua portuguesa, aos efeitos de analisar a dinâmica regional na integração Indústria 4.0 e Economia Circular. Foram excluídos artigos que não tivessem os termos base, Indústria 4.0 ou Economia Circular, em seus resumos e títulos, delimitando assim a pesquisa. Os critérios são apresentados na Figura 3.

Na fase de revisão da literatura, foram considerados os documentos indutores desta pesquisa. Considerando os resultados encontrados, foram analisados aspectos voltados ao desenvolvimento das temáticas Economia Circular e a Indústria 4.0, como propulsores das ações integradoras, geradoras de resultados práticos. Assim, investigamos os meios que utilizam das inovações tecnológicas da Indústria 4.0 e os que incorporaram à Economia Circular, promovendo mudanças nas organizações.

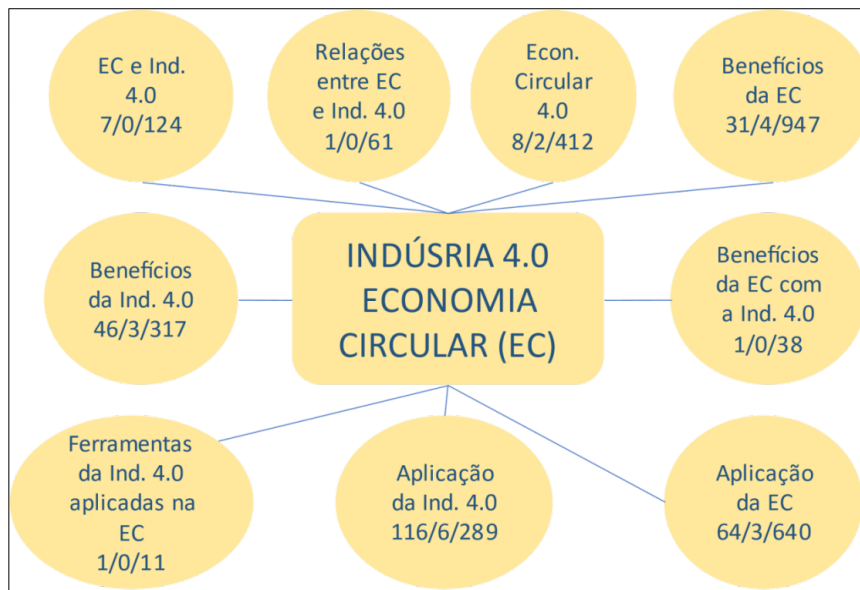


Figura 3 - Explicação do uso das palavras-chave e de suas combinações. Notação em cada palavra-chave: N/M/O correspondem aos números quantitativos de artigos nas bases Google Acadêmico, Scielo, e Periódicos Capes. O total corresponde a 3.132 artigos. Fonte: Elaborada pelos autores.

## 4. Resultados

As tecnológicas habilitadoras da Indústria 4.0 podem ser utilizadas para facilitar a quebra de barreiras e catalisar a adoção da Economia Circular, tanto no processo de obtenção dos insumos, na produção e fabricação, na distribuição, na rastreabilidade do consumo ou na reutilização de rejeitos e produtos descartados. Assim, se promove uma transição dos processos produtivos baseados na Economia Linear para a Economia Circular. Esta seção apresenta uma breve contextualização dividida por tópicos com os principais resultados encontrados a partir das análises de pesquisa. Em um primeiro momento apresentamos uma breve discussão dos principais resultados obtidos através da pesquisa; em seguida podemos visualizar a combinação dos resultados através da Figura 4.

### Economia Circular

De acordo com Sousa Jabbour et al. (2018b), há desafios quando se trata da incorporação conjunta das propostas da Indústria 4.0 e da Economia Circular, lembrando que na visão desta última, os círculos de reacondicionamento, reutilização, e remanufatura, precisam ser rentáveis.

Considerando a Internet das Coisas (IoT), Bressanelli et al. (2018) assinalam em modelos de servitização, e Sinclair et al. (2018) salientam refinar estratégias de desenvolvimento de produto. Os trabalhos de Jabbour et al. (2018a), Gupta et al. (2018), e Tseng et al. (2018) trazem abordagens teóricas que posicionam o Big Data como importante impulsionador para a Economia Circular. Enquanto Dev et al. (2018) abordam a necessidade da tomada de decisão em tempo real. Neligan (2018) investigou a existência de redes digitais e a utilização de diferentes medidas de eficiência. Knoeri et al. (2016) destacam a infraestrutura necessária nas operações para a integração oferecer resultado.

### **Flexibilidade da Produção**

Um dos melhores exemplos de manufatura digital trazidos pela Indústria 4.0 é a impressão 3D. Ao contrário do modo tradicional de manufatura que utiliza cortes de materiais, resultando em perdas e em consequente utilização excessiva de recursos, a impressão 3D utiliza apenas o material necessário para cada peça, sem desperdício. As impressoras operam adicionando camadas sucessivas de materiais para criação dos objetos finais, promovendo dessa forma a visão de manufatura “aditiva”.

Sobras ou produtos com falhas são adicionadas novamente ao insumo, utilizado na fabricação de novos produtos em um processo direto de reciclagem, gerando assim um outro ciclo. Outro ponto a se destacar é a versatilidade de materiais que podem ser utilizados como insumo, como polímeros, metais, biomateriais e até mesmo formas específicas de concreto (MAVROPOULOS, 2015).

### **Rastreabilidade da produção e logística**

Com a utilização da Internet das Coisas, algumas tecnologias passam a ser mais utilizadas. As etiquetas RFID (etiquetas de identificação com uso de rádio frequência), a modo de exemplo, permitem maior monitoramento e contabilidade dos materiais e até mesmo dos resíduos (MAVROPOULOS, 2015).

A rastreabilidade dos materiais recicláveis e de produtos finais permite que os sub-produtos voltem ao ciclo de produção mais facilmente. No futuro, pode-se imaginar que todos os objetos e equipamentos terão um código próprio, permitindo o monitoramento e compartilhamento de dados. O avanço desta tecnologia gera uma redução no uso de insumos e no consumo de energia, pois as empresas terão a possibilidade de ativar

equipamentos somente quando necessário e ainda poderão contar com sistemas inteligentes de gestão de estoque.

### **Aumento na Produção e Reciclagem**

Diversos robôs já são utilizados atualmente em aplicações industriais e a combinação dos mesmos com outros elementos da Indústria 4.0 (como IoT) pode resultar em robôs ainda mais eficientes, e em trabalho colaborativo com os funcionários.

Pode-se mencionar como exemplo, robôs desenvolvidos pela Mitsubishi e pela Universidade de Osaka no Japão, que identificam com eficácia e eficiência diferentes tipos de plásticos misturados a outros resíduos (MAVROPOULOS, 2015). Esses robôs facilitam a caracterização, separação, e aproveitamento em processos de reutilização e reciclagem.

Além disso, o uso de robôs autônomos na produção aumenta a eficiência do processo e a manutenção de parâmetros de tolerância e qualidade, reduzindo assim a quantidade de insumos consumidos por unidade produzida e a necessidade de reprocessamento de produtos com defeito.

### **Integração Horizontal e Vertical**

Dentre os possíveis usos para esta tecnologia nos ciclos produtivos, o avanço da inteligência artificial usada em drones e carros autônomos pode gerar uma revolução na rede logística de empresas e produtos, obtendo uma melhora significativa na mobilidade de pessoas e produtos.

Espera-se que exista um sistema logístico totalmente integrado e capaz de transportar matérias-primas, bens de consumo, produtos, e resíduos, entre outros. Como exemplo podemos citar as empresas Amazon e Google que já rodaram pilotos de entregas de produtos utilizando drones (MAVROPOULOS, 2015), eliminando a necessidade de deslocamento do entregador até o consumidor, e conseqüentemente reduzindo os custos logísticos e a emissão de gases poluentes na atmosfera. Caberá realocar em este tipo de sistema os tradicionais funcionários de transporte, experientes, a outras funções de controle.

A mesma lógica de adoção de veículos autônomos para transportar insumos, produtos, resíduos e pessoas, poderá ser utilizada na estruturação de sistemas de logística reversa mais eficientes. Associado a outras tecnologias, já é possível projetar sistemas totalmente autônomos de entrega de produtos e coleta de descartes diretamente do consumidor. Esse tipo de integração tem um amplo potencial de adoção, podendo

reduzir estoques e custos.

Adicionalmente, é possível monitorar a condição dos ativos e a performance deles, promovendo a manutenção preditiva. Essas informações armazenadas e analisadas (Big Data) permitem com que haja uma previsão de possíveis falhas e melhorar execução de ações de manutenção preventiva, reduzindo quebras e conseqüente descarte de materiais e geração de resíduos.

O armazenamento na nuvem facilita o compartilhamento e o aumento do acesso a estas informações em ambientes de trabalho descentralizados ou virtuais.

Além disso, a digitalização ou virtualização de produtos tem relação direta com a Economia Circular, uma vez que um produto que anteriormente exigia meio físico agora pode ser consumido digitalizado, gerando assim a redução de consumo da matéria-prima.

#### **4.1 Combinação de resultados**

A conexão positiva entre a Indústria 4.0 e a Economia Circular é vista de diversas formas; há uma grande compreensão entre estes dois temas quando se trata da preocupação com os recursos naturais e a poluição do meio ambiente.

O avanço das tecnologias da Indústria 4.0 contribui para que possamos ter um mundo mais limpo e sustentável. Na Figura 4 a seguir podemos visualizar essas tecnologias e quais os benefícios trazidos para economia circular.

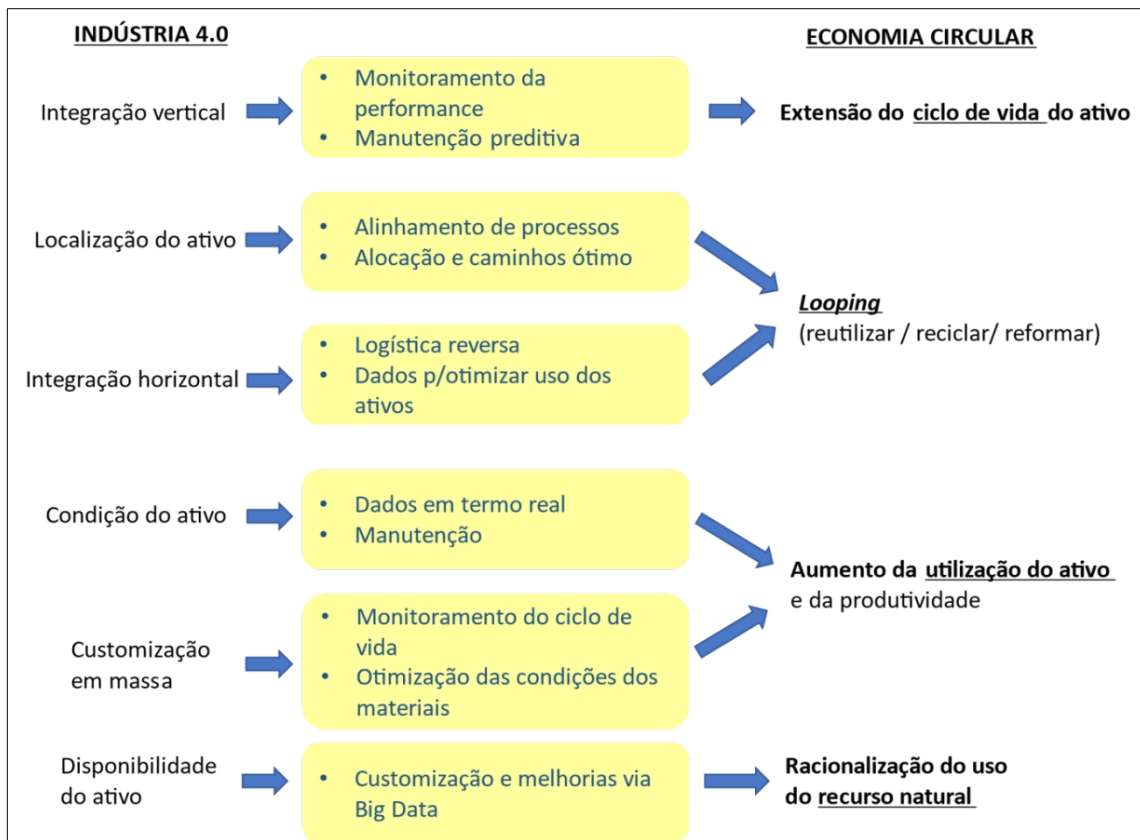


Figura 4- Conexão entre Indústria 4.0 e Economia circular. Fonte: Elaborada pelos autores.

## 5. Conclusões

O presente artigo foi elaborado através de pesquisa bibliográfica. O objetivo foi estabelecer relações entre as tecnologias da Indústria 4.0 e os conceitos da economia circular, contemplando questões de sustentabilidade e viabilidade financeira e operacional das indústrias.

Conclui-se que o avanço das tecnologias digitais e disruptivas relacionadas à Indústria 4.0 são catalizadoras da Economia Circular, atuando como facilitadoras de novos modelos de negócio circulares. Adicionalmente, podem impactar no aumento da qualidade dos produtos e na possível redução dos custos de produção.

Como exemplo, pode-se citar a integração vertical e horizontal, gerando indústrias mais eficazes e eficientes. Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), rastreabilidade, produção, logística, e impressão 3D, descentralizam a produção e aproximam o mercado consumidor do mercado produtor e favorecem a circularidade na economia.

Sugere-se a pesquisa continua sobre a sinergia da Indústria 4.0 e a Economia Circular, em especial do monitoramento de novas aplicações, uma vez que essa integração tem a capacidade de formação de novos ecossistemas industriais capazes de gerar novas oportunidades de negócios e melhorias locais e na rede de suprimentos, potencializando a transição para uma possível nova economia, baseada em paradigmas mais eficientes e sustentáveis.

## Referencias

BARBOZA, DV; DA SILVA, FA; MOTTA, WH; MEIRIÑO, MJ; FARIA, A. do V. Aplicação da Economia Circular no Civil. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, [S. l.] , v. 8, n. 7, 2019.

BOSTON CONSULTING GROUP. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. BCG Perspectives, 2015.

BRESSANELLI, G.; ADRODEGARI, F.; PERONA, M.; SACCANI, N. Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies. Sustainability, v. 10, n. 3, p. 639, 2018.

BUHR, Daniel. Social innovation policy for Industry 4.0. Friedrich-Ebert-Stiftung, Division for Social and Economic Policies, 2015.

DE SOUSA JABBOUR, A.B.L.; JABBOUR, C.J.C., FOROPON, C., GODINHO FILHO, M. When titans meet- Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. Technological Forecasting and Social Change, v. 132, p. 18-25, 2018.

DE SOUSA JABBOUR, A.B.L.; JABBOUR, C.J.C.; GODINHO FILHO, M., ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. Annals of Operations Research, p. 1-14, 2018.

DENYER, D.; TRANFIELD, D. Producing a systematic review. In: BUCHANAN, D.; BRYMAN, A. The Sage Handbook of Organizational Research Methods, London, p. 671-689, 2009.

DEV, N.K.; SHANKAR, R.; GUPTA, R.; DONG, J. Multi-criteria evaluation of real-time key performance indicators of supply chain with consideration of big data architecture. Computers & Industrial Engineering, 2018.

DRATH, Rainer.; HORCH, Alexander. Industrie 4.0: Hit or hype? IEEE Industrial Electronics Magazine, v. 8, n. 2, p. 56-58, 2014.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). Economia circular. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/diagrama-sistemic>>. Acesso maio de 2021.

GUPTA, S.; CHEN, H.; HAZEN, B.T.; KAUR, S.; GONZALEZ, E.D.S. Circular economy and big data analytics: A stakeholder perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 2018.

JONG, M. et al. Sustainable-smart- resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner Production*, v. 109, p. 25-38, 2015.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221-232, 2017.

KNOERI, C.; STEINBERGER, J.K.; ROELICH, K. End-user centred infrastructure operation: towards integrated end-use service delivery. *Journal of Cleaner Production*, v. 132, p. 229-239, 2016.

MAVROPOULOS, A. Fourth industrial revolution and the future of recycling and waste management. [S.l.]: Wasteless future. 2015.

NELIGAN, A. Digitalisation as Enabler Towards a Sustainable Circular Economy in Germany. *Intereconomics*, v. 53, n. 2, p. 101-106, 2018.

OLIVEIRA FILHO, G. R. DE.. A brief reflection on the concept of environmental impact. *CES Journal*, 27(1), 15-28, 2013.

PFEIFFER, S.; The Vision Of "Industrie 4.0" In The Making - A Case Of Future Told, Tamed, And Traded. *Nanoethics - University of Hohenheim*, 2017.

POTT, Crisla Maciel; ESTRELA, Carina Costa. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 31, n. 89, p. 271-283, 2017.

SACOMANO, J. B., GONÇALVES, R. F., BONILLA, S. H., SILVA, M. T. da, SÁTYRO, W. C. *Indústria 4.0: conceito e fundamentos*. 1ª ed. São Paulo: Blucher. p. 182 , 2018

SAKURAI, R., & ZUCHI, J. D. (2018). As Revoluções Industriais Até a Indústria 4.0. *Revista Interface Tecnológica*, 15(2), 480-491. <https://doi.org/10.31510/infa.v15i2.386>

SCHWAB, Klaus. *The Fourth Industrial Revolution*. Genebra: World



Economic Forum, 2016.

SINCLAIR, M.; SHELDRIK, L.; MORENO, M.; DEWBERRY, E. Consumer Intervention Mapping—A Tool for Designing Future Product Strategies within Circular Product Service Systems. *Sustainability*, v. 10, n. 6, p; 101-106, 2018.

TARTAROTTI, Lucas.; SIRTORI, Guilherme.; LARENTIS, Fabiano. Industria 4.0: mudanças e perspectivas. Mostra de iniciação científica UCS, Caxias, novembro/2018.

TSENG, M.; TAN, R.R.; CHIU, A.S.; CHIEN, C.F.; KUO, T.C. Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? *Resources, Conservation and Recycling*, v. 131, p. 146-147, 2018.

WANG, Y.; MA, H. S.; YANG, J. H.; WANG, K. S.; Industry 4.0: A Way From Mass Customization To Mass Personalization Production. *Advances in Manufacturing*. v. 5, n. 4, p. 311-320, dec. 2017.

WANG, Y.; MA, H. S.; YANG, J. H.; WANG, K. S.; Industry 4.0: A Way From Mass Customization To Mass Personalization Production. *Advances in Manufacturing*. v. 5, n. 4, p. 311-320, dec. 2017.

WAUTELET, T. The Concept of Circular Economy : its Origins and its Evolution. Working Paper, January 2018.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17021.87523>.