

A ECONOMIA CIRCULAR NA ERA DA 4ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL: USO DA TECNOLOGIA RUMO À TRANSIÇÃO

THE CIRCULAR ECONOMY IN THE AGE OF THE 4TH INDUSTRIAL REVOLUTION:
USE OF TECHNOLOGY TOWARDS TRANSITION

Cynthia Helena Teixeira 

Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG
Belo Horizonte, MG, Brasil
cyrilet@gmail.com

Ricardo Luiz Perez Teixeira 

Universidade Federal de Itabubá, UNIFEI
Itabubá-MG, Brasil
ricardo.luz@unifei.edu.br

Resumo. A convergência de tecnologias e a modernização tecnológica têm transformado a indústria em uma "fábrica inteligente", com maior controle e automatização dos processos, gerando repercussões socioeconômicas e ambientais no contexto da sustentabilidade. A interseção entre a Economia Circular e a Indústria 4.0 é relevante para viabilizar modelos empresariais frente aos requisitos socioambientais, econômicos e tecnológicos do ecossistema global atual. A mudança de comportamento do consumidor é fundamental nessa transição, exigindo uma mudança de mentalidade e uma abordagem focada no ecossistema e na efetividade. A educação e a formação empreendedora desempenham um papel crucial na transição para a Economia Circular. Princípios de sustentabilidade e economia circular devem ser incorporados aos currículos educacionais, juntamente com o desenvolvimento de habilidades empreendedoras voltadas para a sustentabilidade. A pesquisa realizada envolveu uma revisão sistemática da literatura e destacou a necessidade de estudos mais aprofundados nessa área devido à escassez de artigos disponíveis. Os resultados ressaltam a importância da interseção entre a Economia Circular e a Indústria 4.0, enfatizando o papel do consumidor e da educação empreendedora como fatores-chave para impulsionar a transição para uma economia circular sustentável.

Palavras-chave: Economia Circular, Design Circular, Digitalização, Indústria 4.0, Sustentabilidade.

Abstract. The convergence of technologies and technological modernization has transformed the industry into an intelligent manufacturing system, enhancing process control and automation, which in turn has significant socio-economic and environmental implications within the context of sustainability. The intersection of Circular Economy and Industry 4.0 is highly relevant for facilitating business models to align with the socio-environmental, economic, and technological demands of the current global ecosystem. Consumer behavioral change is imperative during this transition, necessitating a mindset shift and a focused approach on ecosystem dynamics and overall effectiveness. Education and entrepreneurial training play a pivotal role in facilitating the transition towards Circular Economy. It is crucial to integrate sustainability principles and circular economy concepts into educational curricula while fostering the development of entrepreneurial skills with a sustainability-oriented perspective. The research conducted involved a systematic literature review that underlined the pressing need for further comprehensive studies in this field due to the limited availability of articles. The findings underscore the significance of the interplay between Circular Economy and Industry 4.0, highlighting the pivotal role of consumer behavior and entrepreneurial education as key drivers for achieving a sustainable circular economy.

Keywords: Circular Economy, Circular Design, Industry 4.0, Digitization, Sustainability.

INTRODUÇÃO

A economia global é predominantemente linear, em que os produtos são utilizados por um período determinado e descartados como resíduos diversos (ANDREWS, 2015). No entanto, essa abordagem gera problemas a longo prazo devido à exaustão dos recursos e impactos ambientais (ANDREWS, 2015). Diante desse cenário, surge a necessidade de adotar uma "Economia Circular" como solução (SCHYNS; SHAVER, 2021). Embora parte dos produtos seja reciclável, a falta de tecnologias apropriadas e a inviabilidade econômica dificultam a recuperação desses materiais (SCHYNS; SHAVER, 2021).

O desafio das empresas é implementar o modelo de "Economia Circular" para transformar os resíduos em ativos ambientais, tratando-os como passivos ambientais de seus processos produtivos (DE OLIVEIRA; TEIXEIRA, 2023; TEIXEIRA, 2021; IBRACON, 1996). Segundo a Norma de Procedimento de Auditoria Ambiental NPA 11 do Instituto dos Auditores Independentes do Brasil (IBRACON, 1996), o passivo ambiental consiste em:

... toda a agressão que se pratica ou praticou contra o meio ambiente. Consiste no valor dos investimentos necessários para reabilitá-lo, bem como multas e indenizações em potencial. Uma empresa tem passivo ambiental quando ela agride de algum modo ou ação o meio ambiente e não dispõe de nenhum projeto para sua recuperação aprovado oficialmente ou de sua própria decisão (IBRACON, 1996).

Ao reconsiderar o fluxo dos recursos, surgem opções que vão além da redução, como desacelerar, fechar o ciclo e, em última instância, eliminar a fase de destinação final, resultando na geração de zero resíduos (DISSANAYAKE; WEERASINGHE, 2021). No entanto, antes de atingir essa fase, existem alternativas como reutilização, reparação, compartilhamento e reciclagem, entre outras, que visam promover o "ativo ambiental" das empresas (DE OLIVEIRA, TEIXEIRA, 2023).

O modelo de "Economia Circular" propõe um fluxo cíclico dos recursos naturais disponíveis na natureza para a produção, por meio de cadeias produtivas integradas (TEIXEIRA, 2021; GEISENDORF; PIETRULLA, 2018). Nesses sistemas, os recursos são utilizados no mais alto nível de utilidade e valor, formando um sistema industrial intencionalmente reparador ou regenerativo, que traz benefícios tanto do ponto de vista operacional quanto estratégico, além de apresentar um grande potencial de inovação, geração de empregos e crescimento econômico.

A Quarta Revolução Industrial, conhecida como "Indústria 4.0", trouxe a convergência de diversas tecnologias da informação para o estabelecimento de indústrias mais eficientes e inteligentes. Tecnologias como a "Internet das Coisas" (IoT) estão sendo aplicadas em áreas como produção, logística, manutenção e rastreabilidade de produtos, por meio de dispositivos inteligentes que operam como parte dos sistemas ou em sistemas que compõem a cadeia de valor das empresas, como os sistemas ciberfísicos, que simulam processos produtivos do mundo físico para ambientes digitais (XU; XU; LI, 2018).

Os sistemas ciberfísicos integram a computação com os processos físicos, permitindo que computadores e redes incorporem, monitorem, controlem e forneçam informações e dados para os processos físicos (MONOSTORI, 2016). Dessa forma, as empresas podem representar a realidade do mundo físico em ambientes digitais, o que possibilita novas formas de produção, otimização em tempo real, simulação de cenários com maior precisão e criação de valor.

Outra forma de simulação e otimização da produção pode ser realizada por meio da "manufatura aditiva", aplicada no desenvolvimento de produtos por meio do processo de "prototipagem rápida", em que são criados modelos físicos dos projetos de produtos para diversos testes, resultando em economia de tempo e custos na produção e aprimoramento do produto (DOUBROVSKI; VERLINDEN; GERAEDTS, 2011). Além disso, a manufatura aditiva, juntamente com a impressão em 3D na fase de prototipagem, contribui para a descentralização da produção e a redução do consumo de matérias-primas por meio da minimização do desperdício, possibilitando a produção em pequena escala, a fabricação de peças com formas complexas, a customização de design, a redução da geração de resíduos, a diminuição de estoques e riscos de obsolescência, além de permitir uma maior variedade de materiais, que podem ser reciclados.

A "manufatura avançada" introduz o uso de big data para a análise de grandes volumes de dados provenientes de diferentes formatos e fontes (YAN *et al.*, 2017). A tecnologia do *Big Data* traz benefícios significativos para os processos de produção, permitindo a identificação de cenários que possam levar a interrupções na produção e a identificação de gargalos nos processos produtivos, áreas de qualidade, rastreamento de defeitos, suprimentos, design de produtos personalizados, monitoramento em tempo real de equipamentos, entre outros.

Outro conceito introduzido pela "manufatura avançada" é o da rastreabilidade por meio da *blockchain*. A tecnologia *blockchain* é uma ferramenta descentralizada baseada em protocolo P2P (*peer-to-peer* ou ponto a ponto), em que informações criptografadas são enviadas para um destinatário (nó) e simultaneamente transacionadas para diferentes nós com privilégios e influência equivalentes nesse ambiente digital, visando validação anônima (FRAGA-LAMAS; FERNÁNDEZ-CARAMÉS, 2019). A confiança proporcionada pela *blockchain* é especialmente útil nos processos de rastreabilidade de produtos, monitoramento e controle de qualidade na produção, logística para localização e otimização da entrega de produtos, bem como no pós-venda, permitindo o acesso e a auditoria do histórico linear do produto, contribuindo para o desenvolvimento e a credibilidade do produto ou marca. Portanto, a "manufatura avançada", como toda a alta informatização digital e aporte tecnológico trazidos com e junto a esta Quarta Revolução Industrial, possibilita uma ampla expansão dos processos produtivos. Contudo, a expansão gerada, sinaliza também para desafios na contabilidade ambiental decorrentes dos impactos, ao meio ambiente, herdados dos modelos lineares de crescimento econômico. Esse modelo linear da economia, baseado no consumo, na posse, no fácil acesso aos recursos, trouxe e traz o esgotamento de recursos naturais, a acumulação de resíduos e a toxicidade em toda a cadeia produtiva, enfim, o modelo linear não responsabiliza as empresas pelo "passivo ambiental" gerado, e nem incentiva os "ativos ambientais".

A resposta a esse dilema ou problema é encontrada na interseção entre a "Indústria 4.0" e a "Economia Circular". Embora esses conceitos tenham origens e fundamentos distintos, as tecnologias digitais

associadas à Indústria 4.0 podem viabilizar a implementação da Economia Circular, que por sua vez requer tecnologias avançadas, estabelecendo uma relação de reciprocidade entre elas. É importante observar que a digitalização é buscada pelas indústrias devido aos seus benefícios para manter sua competitividade no mercado, enquanto a Economia Circular ainda representa uma mudança de paradigma nos modelos produtivos e de negócios.

Além disso, a transição para a Economia Circular requer uma mudança no comportamento do consumidor e uma readaptação do seu *mindset*. Essa mudança envolve diversos aspectos, como a redefinição do escopo, a reformulação da premissa de eficiência, a revisão da proposta de valor, a mudança de foco, a compreensão das personas, a adoção de princípios éticos, a redefinição do papel do consumidor e a alteração da perspectiva temporal.

As empresas que buscam adotar uma abordagem circular enfrentam o desafio de ampliar sua atuação para além da produção, incorporando também a oferta de serviços em vez de se limitarem à oferta de produtos (LEWANDOWSKI, 2016). Além disso, as relações de trabalho são impactadas pela digitalização e automação tanto na indústria quanto nos serviços, exigindo mão de obra mais especializada para lidar com as novas tecnologias e formas de trabalho. Isso demanda investimentos em qualificação profissional e acarreta um significativo impacto social. Tanto os profissionais quanto as empresas precisam se preparar para os novos padrões de competitividade no mercado de trabalho e se adequar às demandas e regulamentações das políticas públicas.

No âmbito das políticas públicas, a regulamentação desempenha um papel fundamental tanto para as tecnologias da Indústria 4.0 quanto para a Economia Circular, pois pode inviabilizar projetos produtivos ou de manufatura que não estejam em conformidade com as expectativas governamentais em relação ao tratamento do passivo ambiental. Um exemplo recente de infração é a multa e as indenizações milionárias aplicadas pelo Governo de Minas Gerais às empresas Samarco, Vale e BHP devido ao rompimento da barragem do Fundão em 2015. Essa ação resultou na interrupção das atividades da Samarco e na auditoria das demais plantas das empresas mencionadas. Essas infrações, paralisações, multas e indenizações poderiam ter sido evitadas com a adoção do modelo de Economia Circular. No entanto, ainda não houve um amplo debate público sobre a Economia Circular e suas demandas por tecnologias, pessoas e instituições capazes de dominá-las e aplicá-las nos processos industriais e no cotidiano, visando a uma melhor qualidade de vida.

A transição para uma Economia Circular, em conjunto com as tecnologias da Indústria 4.0, apresenta-se como uma oportunidade para que empresas, consumidores, governo e outros atores compreendam esse modelo e cooperem para enfrentar com sucesso um mercado cada vez mais competitivo e com exigências ambientais (JABBOUR *et al.*, 2020).

O objetivo geral deste estudo consiste em discutir a transição para a Economia Circular no contexto da implementação da Indústria 4.0, por meio de suas inter-relações. Para tanto, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos: realizar uma análise minuciosa e abrangente das publicações atuais por meio de uma revisão bibliográfica sistemática sobre os temas "Economia Circular" e "Indústria 4.0"; explorar as características históricas e os principais dados obtidos nessa revisão; identificar as ferramentas da Indústria 4.0 e do design de produção que favorecem o desenvolvimento da Economia Circular; destacar as oportunidades de negócios decorrentes da Economia Circular que podem superar as barreiras existentes; e avaliar o panorama brasileiro em relação ao desenvolvimento de ações voltadas para a Economia Circular.

Conceitos de ativo e passivo ambiental

O ativo ambiental refere-se aos bens adquiridos pelas empresas com o objetivo de controlar, preservar e recuperar o meio ambiente. Esses ativos variam de acordo com as características e processos operacionais de cada organização, englobando todos os recursos utilizados na proteção e conservação ambiental. Trata-se de um recurso controlado pela empresa, proveniente de ocorrências passadas, com a expectativa de trazer benefícios econômicos diretos ou indiretos no futuro (BOTH; FISCHER, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2017).

Os ativos ambientais podem se manifestar na forma de peças e acessórios utilizados para reduzir os níveis de poluição, investimentos em máquinas, equipamentos e instalações que visam mitigar os impactos ambientais. Além disso, incluem o aumento da capacidade, segurança e eficiência de outros ativos da empresa, bem como a prevenção de contaminações futuras e a conservação do meio ambiente. Os gastos com pesquisa e desenvolvimento de tecnologias modernas, a médio e longo prazo, também são considerados ativos ambientais, pois podem trazer benefícios nos exercícios seguintes (BOTH; FISCHER, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2017).

Por outro lado, o passivo ambiental representa uma obrigação da empresa com terceiros, que deve ser liquidada em algum momento. Esse passivo surge de fatos passados ou presentes que geraram um custo ambiental ainda não desembolsado, seja por dívidas efetivas ou por ações futuras relacionadas ao meio ambiente. Essas obrigações exigirão a entrega de ativos ou a prestação de serviços em um prazo determinado ou determinável. Levantar o passivo ambiental significa identificar e caracterizar os impactos adversos ao meio ambiente causados pelas atividades da empresa, abrangendo aspectos físicos, biológicos e humanos. Esses danos podem ser resultado da construção, operação, manutenção, ampliação ou desmobilização de empreendimentos, bem como do gerenciamento inadequado de resíduos industriais. Nesse sentido, as empresas são responsáveis por arcar com indenizações, multas e recuperação de áreas danificadas (BOTH; FISCHER, 2017).

É importante destacar que, devido ao histórico em que as empresas utilizaram recursos naturais sem contabilizá-los adequadamente, torna-se cada vez mais desafiador reconhecer o passivo ambiental. Esse reconhecimento tem um impacto negativo nas demonstrações econômico-financeiras das empresas, podendo levar à interrupção das operações e resultar em penalidades por parte dos órgãos responsáveis pelo licenciamento e fiscalização. No entanto, é necessário ressaltar que também existem aspectos positivos, especialmente quando empresas adotam práticas responsáveis e implementam sistemas de gerenciamento ambiental. Essas ações demonstram o compromisso com a sustentabilidade e podem trazer benefícios tanto para a empresa quanto para o meio ambiente (RIBEIRO *et al.*, 2017).

Política Nacional dos resíduos Sólidos

No Brasil, os primeiros passos rumo à “Economia Circular” se deram com a instituição normativa da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei 12.305/2010, que se constitui como um conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações para o desenvolvimento da gestão e do gerenciamento de resíduos de forma integrada. Essa integração visa a cooperação entre os governos federal, estaduais e municipais, o setor privado e a sociedade civil (ASSUNÇÃO, 2019).

A PNRS traz algumas definições importantes no âmbito do tratamento e da destinação de resíduos sólidos, conforme a seguir (Lei 12.315, 2010): logística reversa: “instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (artigo 3º inciso XII da Lei 12.305/2010); destinação final ambientalmente adequada: “destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos” (artigo 3º inciso VII da Lei 12.305/2010); disposição final ambientalmente adequada: “distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos” (artigo 3º inciso VIII da Lei 12.305/2010); reciclagem: “processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa” (artigo 3º inciso XIV da Lei 12.305/2010); reutilização: “processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa” (artigo 3º inciso XVIII da Lei 12.305/2010); responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos: “conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei” (artigo 3º inciso XVII da Lei 12.305/2010).

Entre os princípios que fundamentam a PNRS estão (Lei 12.315, 2010): “a visão sistêmica na gestão de resíduos sólidos que considere as variáveis social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública”, conforme artigo 6º inciso III da Lei 12.305; “o desenvolvimento sustentável”, conforme artigo 6º inciso IV da Lei 12.305; “a ecoeficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à

capacidade de sustentação estimada do planeta”, conforme artigo 6º inciso V da Lei 12.305; “a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos”, conforme artigo 6º inciso VII da Lei 12.305; “o reconhecimento do resíduo como reutilizável ou reciclável e, ainda, a responsabilidade compartilhada”, conforme artigo 6º inciso VIII da Lei 12.305.

Em termos da ecoeficiência, trata-se de um modelo de gestão ambiental que foi introduzido em 1992 pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), que consiste na gestão eficiente dos recursos, agregando valor sem que isso tenha reflexo no aumento dos preços dos produtos ou serviços. Os fatores identificados para alcançar com êxito a ecoeficiência são: (1) redução da intensidade de uso de materiais; (2) diminuição da demanda intensa de energia; (3) redução da dispersão de substâncias tóxicas; (4) incentivo à reciclagem de materiais; (5) maximização do uso sustentável dos recursos renováveis; (6) prolongamento da vida útil dos produtos; e (7) incremento da intensidade dos serviços (Assunção, 2019).

A PNRS define como objetivos, entre outros (Lei 12.315, 2010): “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (artigo 7º inciso II da Lei 12.305/2010); “adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais” (artigo 7º inciso IV da Lei 12.305/2010); “incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados” (artigo 7º inciso VI da Lei 12.305/2010); “gestão integrada de resíduos sólidos” (artigo 7º inciso VII da Lei 12.305/2010).

Com relação aos princípios e objetivos da PNRS, observa-se que eles buscam, de maneira ampla, integrar os esforços, com foco no desenvolvimento de ações para o atendimento das necessidades da população, pautadas no desenvolvimento sustentável, por meio do uso racional dos recursos e o respeito às diversidades locais e regionais através de uma visão sistêmica (Assunção, 2019).

Foram estabelecidos como instrumentos da PNRS (Lei 12.315, 2010), entre outros: “a coleta seletiva, os sistemas de logística reversa e outras ferramentas relacionadas à implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos” (artigo 8º inciso III); “o incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas ou de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis” (artigo 8º inciso IV); “a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização, tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos” (artigo 8º inciso VI).

No artigo 9 da PNRS foi estabelecido que na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: “não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (Lei 12.315, 2010).

Nos artigos 16 e 18 da PNRS, estão previstas a elaboração do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) e do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) como condição fundamental para estados, Distrito Federal e municípios terem acesso aos recursos da União destinados a empreendimentos e serviços relacionados à gestão de resíduos sólidos, bem como para que recebam benefícios por incentivos ou financiamentos de entidades federais de crédito ou fomento para tal finalidade (Silva et al., 2017).

No artigo 19, são apresentados os requisitos mínimos para a constituição dos planos municipais e as condições mínimas para que os municípios possam ter acesso aos recursos da União, de forma que possam estabelecer suas metas e estratégias para o gerenciamento de resíduos sólidos (Silva et al., 2017).

No artigo 30, estabelece-se a instituição da “responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, consoante as atribuições e procedimentos previstos” (Lei 12.315, 2010).

No artigo 32, estabelece-se que as “embalagens devem ser fabricadas com materiais que propiciem a reutilização ou a reciclagem” (Lei 12.315, 2010).

No Artigo 33, ficam “obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de” (Lei 12.315, 2010): agrotóxicos, seus resíduos e embalagens; pilhas e baterias; pneus; óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

A PNRS trata, além da redução na geração de resíduos, de uma proposta de práticas de hábitos de consumo sustentável e de um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos (ASSUNÇÃO, 2019).

Na prática, os desafios para a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil são grandes. Os instrumentos para a implementação da PNRS, definidos como Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos, a Coleta Seletiva, a Logística Reversa, bem como os Incentivos Fiscais, Financeiros e Creditício, ainda que previstos na lei, não estão adequadamente implementados (FREITAS *et al.*, 2017).

Apesar de entrar na agenda política, ainda perduram controvérsias entre diferentes segmentos representativos da sociedade por interesses conflitantes. Uma das questões centrais discutidas foi o modelo de responsabilidade pós-consumo a ser implementado, que consiste na definição das atribuições de fabricantes, importadores, distribuidores, consumidores e titulares dos serviços públicos de manejo dos resíduos produzidos. A PNRS também criou metas para a eliminação dos lixões, por meio da constituição de instrumentos de planejamento nas esferas nacional, estadual, microrregional, intermunicipal, metropolitana e municipal, além de impor ao setor privado a elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (SILVA *et al.*, 2017).

Muitos municípios brasileiros não estão cumprindo o proposto na PNRS e nem os prazos estipulados, assim a grande maioria dos municípios não conseguiu alcançar soluções para a gestão de resíduos sólidos e nem transformar os problemas com o lixo em oportunidades para a população brasileira, alegando, em grande parte, ausência de recursos, principalmente os financeiros (SILVA *et al.*, 2017).

Ao longo dos últimos anos, o fato de não se ter a aprovação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, após as audiências públicas em todas as regiões do país, demonstra falhas na vontade política e fragiliza tanto a implementação quanto o monitoramento da PNRS pela sociedade. A implementação está lenta e muito aquém das metas por ela estabelecidas, de forma que persistem os lixões e aterros controlados enquanto formas de destinação final dos resíduos em milhares de municípios, principalmente nos pequenos. Os aterros sanitários, como solução de destinação final adequada, só se tornarão viáveis economicamente para municípios pequenos, quando os consórcios públicos se viabilizarem (FREITAS *et al.*, 2017).

As alternativas de gestão de resíduos previstas na PNRS, como a separação em resíduos secos, resíduos úmidos e rejeitos, ainda são pouco implementadas, o que poderia aumentar a coleta seletiva e diminuir os custos. Os resíduos secos podem ser encaminhados para a reciclagem com a instalação de recicladoras, os resíduos úmidos para a compostagem gerando adubo, ou para a biodigestão gerando energia, e os rejeitos, se existentes, para disposição em aterros sanitários consorciados (FREITAS *et al.*, 2017).

A sustentabilidade financeira dos sistemas de gestão de resíduos sólidos ainda é uma realidade distante. Os serviços prestados aos munícipes, em sua maioria, não são cobrados, com o agravante de que, mesmo quando cobram, o valor cobre baixos percentuais dos custos. Ainda se está distante da universalização da coleta seletiva, da eficiência dos sistemas e dos consequentes índices de recuperação de recicláveis, além das imensas desigualdades regionais (FREITAS *et al.*, 2017).

Como resultado positivo na implementação da PNRS, pode-se destacar a existência de organizações de catadores de materiais recicláveis operando a coleta seletiva municipal com resultados expressivos, principalmente nas cidades de menor porte, em que os catadores aparecem como agentes executores que mais coletam seletivamente. Ainda há que se compreender o porquê do baixíssimo índice de recuperação de recicláveis nas grandes cidades e como aproveitar essa expertise nos grandes centros (FREITAS *et al.*, 2017).

Nos termos de uma política pública, a sanção da PNRS criou um marco regulatório, entretanto, a sua efetivação, ainda carece de alguns instrumentos propostos para sua concretude. A gestão da cadeia de resíduos sólidos é de considerável complexidade, uma vez que as políticas públicas dependem da cooperação de todos, com ações de conscientização efetiva, prevenção e monitoramento, que devem ser estimulados, principalmente por meio do Estado para atingir toda a sociedade (CEZARINO, *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2017).

Conforme apontam os resultados do estudo desenvolvido por Cezarino *et al.* (2019), o Brasil possui um ambiente razoável, além de fortes políticas regulatórias para resíduos sólidos que podem estimular a “Economia Circular” no país, porém requer mais comunicação entre os atores envolvidos, especialmente instituições públicas e privadas para relações de longo prazo.

A Quarta Revolução Industrial: Requisitos para a Indústria 4.0 e seus pilares tecnológicos

Com a chegada da Quarta Revolução Industrial, a indústria tradicional passou por uma transformação, tornando-se uma "Fábrica Inteligente" devido à modernização tecnológica e à otimização dos negócios no nível corporativo. Os requisitos necessários para a implementação dessa nova forma de atuação são descritos a seguir (TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2021; INDÚSTRIA 4.0, 2016; BRETTEL, 2014).

O primeiro requisito é a administração em tempo real, que consiste em acompanhar a produção por meio de dados constantemente atualizados (ASTILL, 2020; DAVENPORT, 2012). Isso permite uma tomada de decisão mais rápida e precisa, facilitando a realização de ajustes necessários durante o processo.

A interoperabilidade é outro requisito importante, envolvendo a comunicação contínua entre humanos (responsáveis pela produção) e máquinas/dispositivos/sensores (utilizados no processo) (GANESH; VENKATESH, 2022; MUGARZA; PARRA; JACOB, 2017). Essa comunicação visa avaliar o processo produtivo e adequá-lo aos padrões estabelecidos.

A descentralização refere-se ao controle dos processos produtivos e de tomada de decisões. Os sistemas digitais, por sua natureza, possuem autonomia tanto na realização de atividades quanto na tomada de decisões (LU *et al.*, 2020; ROSSIT; TOHMÉ; FRUTOS, 2019). Além disso, disponibilizam informações sobre o ciclo de trabalho das máquinas, custos, capacidade utilizada, ociosidade, entre outros aspectos relevantes.

A orientação a serviço diz respeito à arquitetura de software voltada para serviços. Isso significa que as funcionalidades são implementadas como serviços, facilitando a integração de diferentes tecnologias, ferramentas e serviços (PAPAZOGLU; VAN DEN HEUVEL, 2007).

A modularidade está relacionada à produção em módulos, permitindo a realização das etapas de produção de acordo com a demanda. Essa abordagem traz flexibilidade para alterar as tarefas das máquinas conforme as necessidades da produção (BRETTEL, 2014).

A virtualização, por sua vez, envolve a instalação de sensores em todos os processos de produção. Isso possibilita o monitoramento e rastreamento dos processos, aumentando a eficiência e prevenindo falhas. Além disso, permite a simulação computacional utilizando dados em tempo real (TORKUL; SELVI; ŞIŞCI, 2022; COHEN *et al.*, 2019).

Esses requisitos são fundamentais para a implementação bem-sucedida da Fábrica Inteligente, impulsionando a eficiência e a produtividade das empresas na era da Indústria 4.0 (MITTAL, 2018). A adoção dessas tecnologias e práticas representa uma evolução significativa no setor industrial, permitindo maior agilidade, flexibilidade e otimização dos processos produtivos (ALBERTIN *et al.*, 2017; INOUE *et al.*, 2019; TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2021).

Além dos requisitos mencionados anteriormente, as "Fábricas Inteligentes" são suportadas por pilares tecnológicos, tais como Internet das Coisas, Computação em Nuvem, Inteligência Artificial, Manufatura Aditiva, Simulações, Robôs Autônomos, *Big Data*, Impressão 3D, entre outros (ALBERTIN *et al.*, 2017; INOUE *et al.*, 2019; TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2021). Esses pilares e tecnologias associadas são apresentados de forma esquemática na Figura 1.

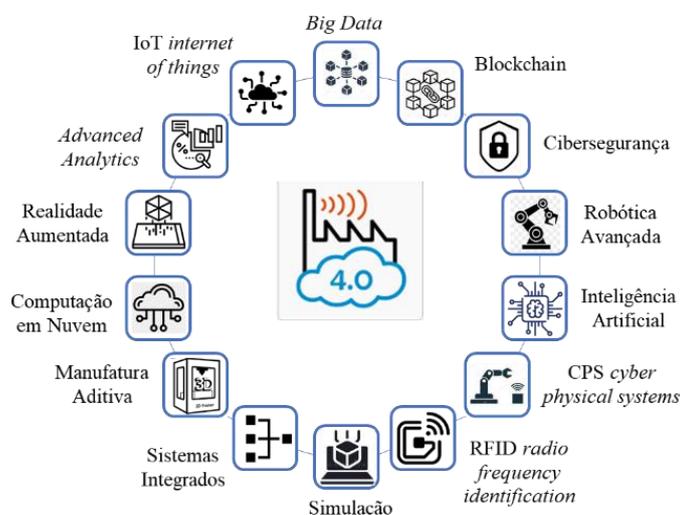


Figura 1. Representação esquemática das principais tecnologias da “Indústria 4.0” empregadas nas “Fábricas Inteligentes”. Fonte: Teixeira (2021)

No contexto brasileiro, o desenvolvimento da Indústria 4.0 ainda se encontra em estágio inicial, com empresas locais buscando se modernizar em direção a essas tecnologias. No entanto, essa tendência ainda não reflete a média das empresas do país, que têm adotado níveis limitados de automação e informatização, devido à falta de incorporação das tecnologias provenientes da Terceira Revolução Industrial (SPUTNIK BRASIL, 2021).

Por outro lado, nos países desenvolvidos, o debate em torno das novas tecnologias teve início logo após a crise global de 2008, ou seja, há mais de uma década, quando se iniciaram os esforços para a formulação de políticas voltadas a esse propósito. Países como Estados Unidos, China, Alemanha, Coreia do Sul, Japão, França e Reino Unido estão entre os mais avançados no desenvolvimento de máquinas e equipamentos para viabilizar a nova revolução industrial (KLINGENBERG; BORGES; DO VALE ANTUNES JR, 2022; KOPP; HOWALDT; SCHULTZE, 2016).

A consolidação da Indústria 4.0 como um ecossistema inovador tem gerado grandes expectativas quanto aos seus efeitos econômicos e ambientais, o que tem impulsionado o desenvolvimento de diversos estudos de pesquisa (DIAZ-CHAO *et al.*, 2021). Em um estudo conduzido por BAG *et al.* (2021), foram avaliados os desafios relacionados à adoção da Indústria 4.0, com o objetivo de desenvolver um modelo teórico que identificasse os recursos-chave necessários para impulsionar o progresso tecnológico e seu impacto na produção sustentável e na capacidade da Economia Circular. Os resultados dessa pesquisa apontaram os seguintes recursos essenciais: sistemas de produção, recursos humanos, gerenciamento de projetos, liderança de gerenciamento, logística verde, design verde, tecnologia da informação, análise de big data e relacionamentos colaborativos. Além disso, concluiu-se que a Indústria 4.0 possui uma relação positiva com a produção sustentável, e a produção sustentável, por sua vez, tem uma relação positiva com as capacidades da Economia Circular (BAG *et al.*, 2021).

Observa-se que as tecnologias da Indústria 4.0 apresentam convergência com a agenda de sustentabilidade, tendo potencial para reorganizar a cadeia produtiva. A Indústria 4.0 e a sustentabilidade são dois pilares industriais do futuro que se comunicam e se inter-relacionam. A adoção das tecnologias 4.0 possibilitará uma trajetória mais sustentável para o desenvolvimento industrial (TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2022; SPUTNIK BRASIL, 2021).

No âmbito das políticas públicas, a regulação desempenha um papel crucial, tanto no campo das tecnologias da Indústria 4.0 (OTTONICAR *et al.*, 2019) quanto no campo da Economia Circular. As tecnologias demandam profissionais e instituições capazes de dominá-las e aplicá-las nos processos industriais e no cotidiano, visando a melhoria da qualidade de vida.

MÉTODO

A metodologia de pesquisa empregada neste estudo classifica-se, quanto aos objetivos, como uma pesquisa exploratória (HALLINGBERG, 2018; PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015; VEZZOSI, 2009.). O objetivo principal da pesquisa foi obter embasamento teórico por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada e a construção de possíveis hipóteses. O protocolo utilizado foi inspirado no proposto por Davies e Crombie (1998). Os autores sugeriram que o protocolo deveria conter informações sobre as questões específicas abordadas pelo estudo, a estratégia de busca para identificação de estudos relevantes e critérios para inclusão e exclusão de estudos na revisão.

A estratégia de pesquisa adotada consistiu em realizar uma revisão sistemática da literatura utilizando o Portal de Periódicos da CAPES (Portal CAPES) por meio da rede da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe) (CALEGARI; TEIXEIRA; SILVA, 2023; BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022; DEWALT, 2004). A busca foi realizada utilizando a função "busca Assunto" que inclui todas as bases de pesquisa disponibilizadas pela CAPES. Foram utilizadas as palavras-chave "Economia Circular" e "Indústria 4.0", considerando tanto um contexto global como especificamente para o Brasil. A pesquisa abrangeu trabalhos publicados nos últimos 5 anos (no período de 2015 a 2021) em língua portuguesa, espanhola e inglesa, conforme apresentado na Tabela 1.

A seleção dos artigos foi feita com base em critérios de inclusão (PATI; LORUSSO, 2018; FERRARI, 2015). Foram considerados os artigos que apresentavam resumos em português, espanhol e inglês, disponibilização online do artigo completo e descrição de abordagem quantitativa em relação à análise de associação entre "Economia Circular" e "Indústria 4.0", incluindo fatores socioambientais. Foram excluídos os artigos que não passaram por revisão por pares, os estudos de abordagem qualitativa e aqueles de cunho quantitativo que se limitaram à descrição de medidas de frequência. Além disso, foram excluídos capítulos de livro, resenhas, relatos de caso e editoriais.

Tabela 1. Estratégia de pesquisa da revisão sistemática da literatura.

REQUISITOS DE BUSCA	
Base de dados	todas as "bases de Pesquisa" disponibilizadas pela CAPES
Tipo de busca	artigos publicados
Palavras-chave	economia circular e indústria 4.0
Idiomas	português, inglês e espanhol
Período	2015 a 2021

Fonte: dados dos autores (2022)

A pesquisa realizada neste estudo se enquadra, quanto à natureza, como uma investigação científica, cujo objetivo é avaliar a prática do conteúdo abordado. A abordagem adotada na pesquisa é essencialmente qualitativa, buscando aprofundar a compreensão crítica sobre a qualidade das evidências da correlação entre "Indústria 4.0" e "Economia Circular" para a implementação da sustentabilidade na gestão dos meios produtivos industriais e serviços relacionados a esses meios.

A estratégia de pesquisa utilizada foi uma revisão sistemática da literatura. Para isso, foram considerados os requisitos de busca apresentados na Tabela 1. A busca foi realizada em todas as "bases de Pesquisa" disponibilizadas pela CAPES, com foco em artigos publicados. As palavras-chave utilizadas foram "economia circular" e "indústria 4.0". Os idiomas considerados foram o português, inglês e espanhol. O período de análise compreendeu os anos de 2015 a 2021.

Essa abordagem metodológica visa a obtenção de dados relevantes e atualizados sobre o tema, a fim de embasar as discussões e análises realizadas no estudo. A escolha por uma abordagem qualitativa permite uma análise aprofundada das relações entre os conceitos investigados, contribuindo para a compreensão crítica da temática abordada.

RESULTADOS

Análise dos resultados da revisão da literatura

Com base nos procedimentos metodológicos propostos (critérios de busca, critérios de inclusão e de exclusão), os resultados da busca de artigos da literatura são apresentados na Figura 2. Na etapa 1 (mostrada na Figura 2) obteve-se, com os critérios de busca, o total de 360 artigos (357 em inglês e 3 em português/espanhol). Contudo, ao se aplicar os critérios de inclusão e exclusão nas etapas 2 e 3 (mostrado na Figura 2), obteve-se o total de artigos de 41 (39 em inglês e 2 em português/espanhol). Portanto foram selecionados 41 artigos que responderam aos critérios de seleção dos 360 artigos apresentados pelo CAFe. Pôde-se perceber à princípio, através do número de artigos selecionados, que o tema de pesquisa é bem recente e pouco desenvolvido, tornando a temática desta pesquisa relevante.

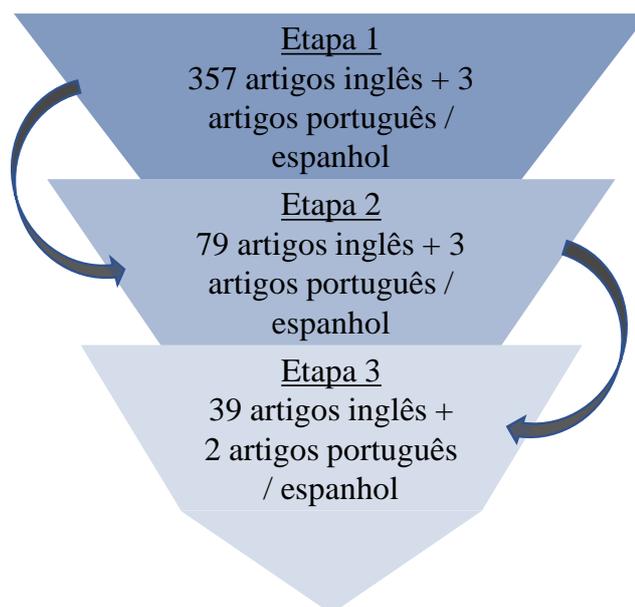


Figura 2. Esquema detalhado das etapas da revisão sistemática de pesquisa. Fonte: Teixeira (2021)

Ainda, com relação aos artigos selecionados para o desenvolvimento deste trabalho, a Figura 3 apresenta graficamente o Número de Publicações por Ano de Publicação que atenderam aos critérios de seleção. Nota-se um expressivo aumento do número de publicações nos últimos 3 anos (2019-2021), sendo que, para o ano de 2021 foram levantadas somente as publicações relativas ao primeiro semestre do ano corrente. Desta forma, o número de publicações em 2021 (que poderia ser selecionado) deverá ser consideravelmente maior que o do ano anterior, o que reflete o interesse pelo tema através do desenvolvimento de estudos científicos.

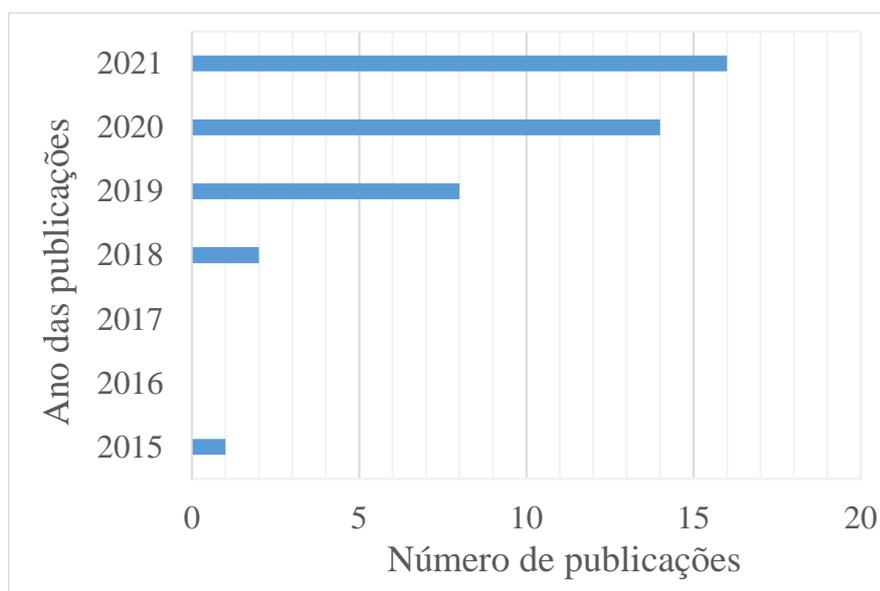


Figura 3. Apresentação gráfica da seleção de artigos em Ano das Publicações por Número de Publicações.
Fonte: Teixeira (2021)

Mudança de comportamento do consumidor

As mudanças de comportamento do modelo linear para o Circular passam por uma mudança de *mindset*, assim, vários aspectos podem ser analisados. O escopo precisa deixar de ser no processo em si e passar para o ecossistema. A premissa de eficiência deve passar a efetividade, a eficiência está relacionada a um trabalho bem-feito, enquanto a efetividade diz respeito a capacidade de produzir e manter um efeito, que no caso deseja-se que seja positivo. A proposta de valor de redução de custos pode ir além, para a geração de valor. O foco nos lucros deve passar à inovação e aos novos valores. As personas como shareholders (proprietários e acionistas) podem incluir demais interessados como stakeholders (todas as partes interessadas). A ética da competição deve ser abandonada e passar à ética da colaboração. O papel de consumidor deve passar ao papel de usuário. A visão de curto prazo pode ser ampliada para o longo prazo (AMB, 2020).

Nos modelos de negócios, um exemplo bastante conhecido é o uso compartilhado de bicicletas e patinetes, o que envolve o uso da tecnologia, em um ambiente de negócios de uma “Economia Circular”, em que para o uso do produto basta acessar no celular o aplicativo de aluguel. Esse tipo de serviço pode ser estendido para outros equipamentos, promovendo a maximização desse modelo. A mudança na forma de utilizar produtos e serviços mostra, além da mudança no modelo de negócio, a mudança no comportamento do consumidor. O consumidor pode ter acesso, porém não precisa ter a posse (IDEIA CIRCULAR, 2021).

A mudança de comportamento do consumidor não é simples, passa por uma readaptação na relação que desenvolvemos durante toda nossa experiência de consumo. A posse acaba gerando o apego, o que no compartilhamento não existe. Assim, essa forma de nos relacionarmos com produtos e serviços já é melhor aceita pelas novas gerações, que entendem que podem usufruir, sem precisar de ter (Ideia circular, 2021).

O compartilhamento de produtos/serviços precisa ser estendido também às empresas, disponibilizando ofertas de aluguel ou de contratação de serviço por tempo determinado, assim as empresas podem se beneficiar até mesmo com a diminuição da necessidade de grandes investimentos (Ideia circular, 2021).

Dessa forma, o esforço da mudança requer que as empresas também se adaptem não só na produção, mas também passem a oferecer mais serviços no lugar de produtos. A oferta de serviços pode atingir mais pessoas interessadas em um mesmo produto, o que diminui o desperdício e leva à redução de custos (IDEIA CIRCULAR, 2021).

A formação do profissional também precisa ser adequada, a fim de preparar pessoas para atuar com as novas tecnologias e com as novas formas de trabalho. Da mesma forma, as empresas também precisam se preparar para atuar, conhecendo as tecnologias e como utilizá-las da melhor forma, o que pode significar mudanças culturais. Tanto profissionais quanto empresas precisam se preparar para os novos padrões de atuação e de competitividade no mercado de trabalho (IDEIA CIRCULAR, 2021).

Um aspecto importante a ser observado, com cautela, é com relação à mudança nas relações de trabalho, pois com a automação dos processos, cada vez menos mão de obra será necessária, aliás não só nas indústrias, mas na área de serviços também. Por outro lado, a mão de obra requerida tende a se tornar mais especializada, o que demanda qualificação profissional e tudo isso gera um grande impacto social (IDEIA CIRCULAR, 2021).

Educação e formação empreendedora

A educação e formação profissional devem ocorrer através da capacitação formal, podendo ser reforçada por meio de campanhas educativas amplas, dando condições tanto técnicas quanto financeiras para sustentar os princípios e valores que se deseja para a sociedade e para a indústria brasileira como sustentável e circular. Em termos de Pesquisa e Desenvolvimento, além do know-how, que garante a competitividade de indústrias e colaboradores, é necessária a elaboração de projetos e, principalmente, o acesso aos recursos materiais e financeiros.

O desenvolvimento de competências em empreendedorismo, para a sustentabilidade, deve ser incorporado nos currículos, para que os futuros profissionais conheçam esses princípios e estejam capacitados para aplicá-los. A “Economia Circular” irá criar empregos em todos os setores industriais para profissionais com conhecimento especializado. A educação é o pilar, sendo importante o papel da educação empreendedora e da inclusão de temáticas relacionadas à sustentabilidade e à “Economia Circular” nos planos curriculares (LUCAS *et al.*, 2019).

A necessidade de mudanças de atitude e a quebra de paradigmas na sociedade é, de maneira geral, tanto mais fácil quanto mais acesso à educação tiver a população, de forma que quem tem mais acesso ao conhecimento e aos procedimentos mais inovadores, mais facilmente adota novos comportamentos, na medida em que compreende melhor as vantagens dessas alterações. A introdução de novos valores e paradigmas, no contexto do sistema educativo nos diversos níveis de escolaridade, é uma das formas mais eficazes de promover mudanças de comportamentos e atitudes nas sociedades (LUCAS *et al.*, 2019).

Trabalhos desenvolvidos pela Ellen MacArthur Foundation preconizam que a sensibilização para o modelo da “Economia Circular”, seja feita através do processo ensino-aprendizagem, e que ele seja considerado de forma holística e através das respectivas interações com o “mundo real”. Assim, o ensino superior pode promover o modelo da “Economia Circular” através de três etapas / momentos fundamentais: i) o desenvolvimento de percepções / conhecimento junto aos alunos relativamente aos sistemas não lineares, complexos e dinâmicos; ii) a promoção do conhecimento acerca da forma como a “Economia Circular” pode ser entendida, considerando aqui os diversos atores (empresas, governo, cidadãos) e o modo de funcionamento complexo dos sistemas vivos, simulando um modelo de análise aplicado a uma estrutura econômica em concreto; iii) associando os conhecimentos anteriores e utilizando modelos de aprendizagem participativa, desenvolvendo modelos de análise passíveis de utilização em diversas aplicações, associando sistemas do mundo real, economia e aprendizagem (Lucas *et al.*, 2019).

A fixação e retenção do conhecimento sobre a “Economia Circular” e o desenvolvimento sustentável, a sua transferência e as boas práticas para a sociedade são um desafio aos estudantes, profissionais e instituições de ensino (Lucas *et al.*, 2019).

É de se esperar que, novos modelos de negócios criem empregos, o que precisa ser analisado com cuidado. Segundo Birkel e Miller (2021) as mudanças trazidas pela “Indústria 4.0” eliminarão certos empregos, com no caso do trabalho manual sendo automatizado, mas impulsionará outros, podendo afetar os perfis de trabalho e programas de treinamento. Conforme Sputnik Brasil (2021), como as tecnologias da “Indústria 4.0” prometem ganhos de produtividade muito elevados, as plantas produtivas 4.0 irão permitir melhores salários aos profissionais.

No contexto da “Economia Circular”, presume-se, à princípio, que novas oportunidades de emprego surgirão para perfis de empregos de baixa renda, uma vez que as atividades de reciclagem, reutilização e

remanufatura (como no modelo linear) são intensivas em mão de obra e não em recursos. Contudo, há também processos avançados que demandam mão de obra mais especializada, principalmente com o uso das tecnologias 4.0.

Ecossistema integrativo circular 4.0

A “Indústria 4.0” traz vários recursos que podem apoiar a transição para uma “Economia Circular”, dado que esta última necessita de recursos avançados, com uma indústria mais modernizada, para sua implementação. A Figura 4 mostra de forma esquemática os pontos chaves desses temas e as inter-relações entre a “Economia Circular” e a “Indústria 4.0”, destacando-se na região de transição o design que se refere a processos, produtos e negócios; a sustentabilidade nos níveis ambiental, econômico e social; as políticas públicas de fomento; o comportamento relacionado à mudança de *mindset* e a educação formal e empreendedora da sociedade como um todo.

A realidade que temos que lidar é que estamos diante de grandes barreiras, também vistas como desafios para acelerar a “Economia Circular” no Brasil, o que mostra que não se trata de um processo simples. Nesse contexto, para implementar ações tão amplas e desafiadoras, é necessário haver o envolvimento de governos, empresas e sociedade civil. As indústrias e empresas precisam estar atentas a seis grandes campos de atuação a saber: social, saúde, meio ambiente, inovação em produtos, mudanças climáticas e garantia do cliente, pois são eles que abrem possibilidades para uma mudança da economia a fim de alcançarmos mais qualidade de vida.

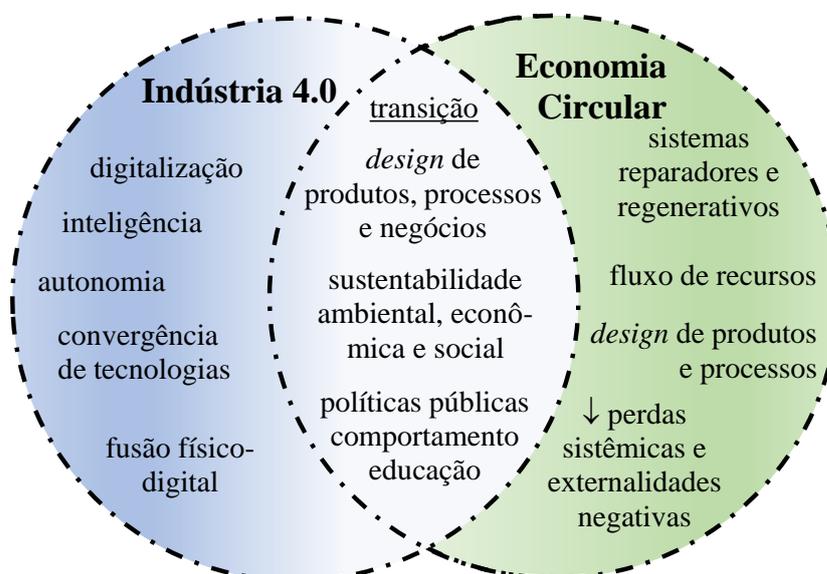


Figura 4. Aspectos principais e inter-relações entre a “Economia Circular” e a “Indústria 4.0”.

Fonte: Teixeira (2021)

Alguns desafios dessa transição, com foco no panorama brasileiro, são citados a seguir (Assunção, 2019; CEZARINO *et al.*, 2019): divulgar, incentivar e investir no conhecimento sobre a “Economia Circular”; desenvolver a visão estratégica de negócios para oportunidades frente à “Economia Circular”; regulamentar os novos modelos de negócios com princípios circulares; promover a integração de processos entre empresas (dispersão geográfica do Brasil); desenvolver métricas e indicadores de circularidade; resolver problemas de infraestrutura; incentivar o uso de recursos em múltiplos ciclos; promover a separação de resíduos na fonte; melhorar a aceitação dos produtos reciclados por consumidores e empresas; desenvolver condutas de responsabilidade nos âmbitos social, econômico e ambiental; promover mudanças de atitude em relação às questões ambientais; promover a educação ambiental em todos os níveis; incentivar e fornecer capacitação profissional; adequar aspectos regulatórios e normativos; melhorar o sistema de tributação, em vista da tributação brasileira indireta; promover a mudança de cultura da indústria brasileira como sustentável (circular); estabelecer parcerias intersetoriais para compras / vendas sustentáveis; estabelecer parcerias entre academia e setor privado; fortalecer as cadeias produtivas e os setores industriais; alinhar as políticas de acesso aos financiamentos para recursos, projetos e pesquisas; fortalecer as políticas ambientais, mais especificamente a PNRS; desenvolver políticas de suporte à inovação para incentivar o design de

produtos; desenvolver políticas de compras públicas sustentáveis; melhorar a articulação das esferas pública e privada para a promoção de novos modelos de negócios digitais.

Com relação à “Indústria 4.0” os desafios também são grandes (com foco no panorama brasileiro) (CEZARINO *et al.*, 2019; OTTONICAR *et al.*, 2019): promover o conhecimento sobre os benefícios trazidos pelo avanço tecnológico; melhorar a infraestrutura e o acesso às tecnologias; resolver os problemas de conectividade (redes de banda larga e móveis); promover a qualificação e competência da força de trabalho frente às novas demandas; promover a mudança de *mindset* para a atual dinâmica de desafios tecnológicos e de perfis profissionais mais cada vez mais especializados; desenvolver políticas industriais para desenvolvimento / aquisição de tecnologias e bens de capital; promover a articulação entre as partes interessadas na inovação do ecossistema.

Contudo, há sempre a oportunidade de se começar com pequenas práticas, ou melhor dizendo, com boas práticas em “Economia Circular”, com o apoio das tecnologias da “Indústria 4.0”, tais como: reduzir o uso de recursos primários por meio do design modular, reuso, remanufatura e reciclagem; recuperar recursos, através da troca de resíduos entre empresas; utilizar insumos circulares provenientes de reparo, acondicionamento, remanufatura, reciclagem e/ou renováveis; utilizar serviços digitais, em substituição a infraestruturas e ativos físicos; promover o fornecimento de produtos como serviços; ampliar do uso de produtos através do compartilhamento; estender a vida dos produtos por meio do ecodesign e da manutenção; otimizar processos produtivos, reduzindo o desperdício de materiais.

Mesmo com tantos desafios (barreiras) a serem superados, mas com uma nova mentalidade empresarial, a “Economia Circular” mostra caminhos para se conduzir organizações e sociedades na atual revolução industrial ao desenvolvimento sustentável. A aplicação dos conhecidos princípios 3Rs da sustentabilidade (*reduce, reuse, recycle*) que evoluíram para os 6Rs (*reduce, reuse, recycle, recover, remanufacture e redesign*), para os 10Rs (*refuse, rethink, reduce, reuse, repair, refurbish remanufacture, repurpose, recycle e recover*), e tornaram-se ainda mais amplos com a abordagem do modelo ReSOLVE (*regenerate, share, optimize, loop, virtualize e exchange*), contando com as tecnologias da “Indústria 4.0”, podem apoiar a transição para uma “Economia Circular” (Figura 13).

A Figura 5 mostra várias possíveis relações, entre a indústria sustentável e a sociedade consciente e responsável, que podem ser estabelecidas no ecossistema. A indústria trabalha de forma sustentável nos seus processos, o que se faz extensivo à toda cadeia de valor, e adota o design da circularidade em seus produtos e processos. A sociedade prefere o uso ao invés do consumo e busca utilizar o produto como serviço, assim age exigindo das empresas o fornecimento de soluções que respeitem os princípios da circularidade.

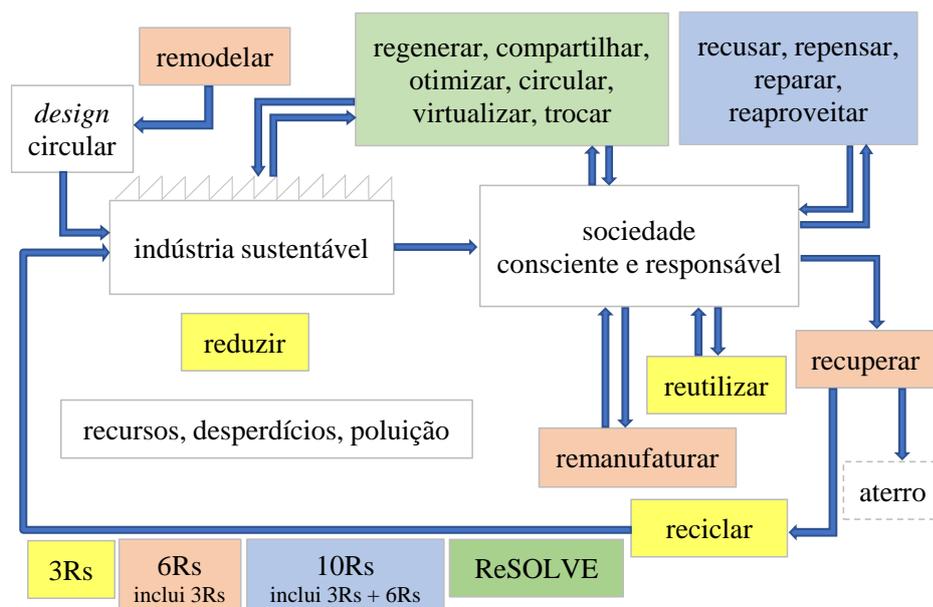


Figura 5. Diagrama para o desenvolvimento sustentável das organizações na atual revolução industrial para uma “Economia Circular”. Fonte: Teixeira (2021)

CONCLUSÃO

Em conclusão, a análise dos resultados da revisão da literatura revelou que o tema de pesquisa relacionado à Economia Circular é recente e ainda pouco desenvolvido. Através dos procedimentos metodológicos adotados, foi possível selecionar 41 artigos que atendiam aos critérios de inclusão e exclusão, dentre um total de 360 artigos inicialmente identificados. Esse número limitado de estudos selecionados ressalta a relevância da temática e a necessidade de avançar no conhecimento sobre a Economia Circular.

Além disso, a análise dos artigos selecionados mostrou um expressivo aumento no número de publicações nos últimos três anos, evidenciando um crescente interesse pelo tema e o desenvolvimento de estudos científicos. Isso indica uma tendência de maior atenção e investimento na pesquisa e aplicação da Economia Circular.

As mudanças de comportamento do consumidor são um aspecto central na transição para um modelo econômico circular. A adoção de uma mentalidade circular implica em uma mudança de *mindset*, passando de um enfoque no processo para o ecossistema como um todo. Isso envolve a transição da eficiência para a efetividade, da busca por redução de custos para a geração de valor, da competição para a colaboração, da posse para o compartilhamento, entre outras transformações. Essa mudança de comportamento é desafiadora, mas essencial para a adoção de práticas sustentáveis e a construção de um sistema econômico circular.

A educação e formação empreendedora desempenham um papel fundamental na promoção da Economia Circular. É necessário incorporar o desenvolvimento de competências em empreendedorismo sustentável nos currículos educacionais, preparando os futuros profissionais para aplicar os princípios da Economia Circular. Além disso, a sensibilização para a Economia Circular deve ocorrer ao longo do processo de ensino-aprendizagem, envolvendo a compreensão dos sistemas complexos e dinâmicos, a análise da forma como a Economia Circular pode ser implementada em diferentes contextos e a aplicação prática desse conhecimento.

No entanto, a transição para uma Economia Circular enfrenta desafios significativos. É imperativo que haja engajamento dos governos, das empresas e da sociedade civil, bem como a superação de obstáculos como a falta de conhecimento, a necessidade de regulamentação adequada, a melhoria da infraestrutura, a mudança cultural na indústria e a criação de parcerias intersetoriais. Além disso, é fundamental promover a conscientização e a mudança de atitude em relação às questões ambientais, além de investir em capacitação profissional e desenvolvimento de métricas de circularidade.

Em síntese, a transição para uma Economia Circular é um processo complexo, porém necessário para promover a sustentabilidade e a eficiência na utilização de recursos. A análise dos resultados da revisão da literatura ressalta a importância de aprofundar o conhecimento nessa área e promover ações concretas para impulsionar a adoção da Economia Circular no contexto brasileiro.

A partir da discussão e conclusão dos temas abordados, fica evidente que, embora os conceitos e as análises apresentados sejam discutidos na literatura, é fundamental avançar para a implementação prática da Economia Circular em conjunto com a Indústria 4.0. A transição para uma Economia Circular traz oportunidades econômicas, ambientais e sistêmicas tanto para as empresas quanto para os cidadãos, em todos os setores.

REFERÊNCIAS

- ALBERTIN, M. P.; ELIENNESIO, M. L. B.; AIRES, A. S.; PONTES, H. L. J.; JUNIOR, D. P. A. Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura. In: XXXIV Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, SP, Brasil, 2017.
- ANDREWS, Deborah. The circular economy, design thinking and education for sustainability. *Local economy*, v. 30, n. 3, p. 305-315, 2015.
- ASSUNÇÃO, G. M. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. *Revista Eletrônica Sistemas & Gestão*, v.14, n.2, p.223-231, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.20985/1980-5160.2019.v14n2.1543>.
- ASTILL, Jake et al. Smart poultry management: Smart sensors, big data, and the internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 170, p. 105291, 2020.
- BAG, S.; YADAV, G.; DHAMIJA, P.; KATARIA, K. K. Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: An empirical study, *Journal of Cleaner Production*, v.281, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125233>.

BARBOSA, Mariana Oliveira; SILVA, Priscilla Chantal Duarte; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. Aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, p. e022018-e022018, 2022.

BIRKEL, H.; MULLER, J. M. Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability - A systematic literature review, *Journal of Cleaner Production*, v.289, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125612>.

BOTH, F.; FISCHER, A. Gestão e contabilidade ambiental. *Unoesc & Ciência, Área das ciências sociais aplicadas - ACSA, Joaçaba*, v. 8, n. 1, p. 49-57, jan./jun. 2017. Disponível em: <https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acsa/article/view/12599/pdf>. Acesso em: 30/06/2021.

BRETTEL, Malte et al. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Information and Communication Engineering*, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.

CALEGARI, Caio Lage; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez; SILVA, Priscilla Chantal Duarte. Produção de alumínio secundário: uma revisão sistemática da literatura. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, p. e023013-e023013, 2023.

CEZARINO, L. O.; LIBONI, L. B.; Stefanelli, N. O. Oliveira, B. G.; Stocco, L. C. Diving into emerging economies bottleneck: industry 4.0 and implications for circular economy. *Management Decision*, 0025-1747. DOI: <https://doi.org/10.1108/MD-10-2018-1084>.

COHEN, Yuval et al. Assembly systems in Industry 4.0 era: a road map to understand Assembly 4.0. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 105, p. 4037-4054, 2019.

CONCEIÇÃO, Isabella Carolina et al. Os discursos sobre a indústria 4.0 no setor de estampagem da indústria automobilística: uma revisão sistemática da literatura. *Revista de Casos e Consultoria*, v. 13, n. 1, 2022.

DAVENPORT, Thomas H. et al. How big data is different. 2012.

DAVIES, H. T. O.; CROMBIE, I. K. Getting to Grips with Systematic Reviews and Meta-Analyses, *Hospital Medicine*, v.59, n.12, p.955-958, 1998.

DE OLIVEIRA, J. P.; TEIXEIRA, R. L. P. The Circular Economy: a Case Study Approach Case Study of the Production of Metallized Briquets and Their use in Steel Blast Furnace. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 17, n. 2, p. e03351, 2023. URL: <https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/3351>.

DEWALT, Darren A. et al. Literacy and health outcomes: a systematic review of the literature. *Journal of general internal medicine*, v. 19, n. 12, p. 1228-1239, 2004.

DIAZ-CHAO, A.; FICAPAL-CUSI, P.; TORRENT-SELLENS, J. Environmental assets, industry 4.0 technologies and firm performance in Spain: A dynamic capabilities path to reward sustainability, *Journal of Cleaner Production*, v.281, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125264>.

DOUBROVSKI, Zjenja; VERLINDEN, Jouke C.; GERAEDTS, Jo MP. Optimal design for additive manufacturing: opportunities and challenges. In: *International design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*. 2011. p. 635-646.

DISSANAYAKE, D. G. K.; WEERASINGHE, D. Towards circular economy in fashion: Review of strategies, barriers and enablers. *Circular Economy and Sustainability*, p. 1-21, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION A. Economia circular – Escolas de pensamento. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/escolas-de-pensamento>. Acesso em: 04/05/2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION B. Infographic - Circular economy system diagram. Disponível em: www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/infographic. Acesso em: 04/05/2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo à Economia Circular: o racional de negócio para acelerar a transição. 2015. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-a-a%CC%80-economia-circular_Updated_08-12-15.pdf. Acesso em: 30/04/2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Ativos inteligentes – A liberação do potencial da economia circular. 2016. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/IA_Portuguese_1.pdf. Acesso em: 30/04/2021.

- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Uma economia circular no Brasil: uma abordagem exploratória inicial. Programa CE100 Brasil. Janeiro, 2017. Disponível em: [Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf](#). Acesso em: 30/04/2021.
- FERRARI, Rossella. Writing narrative style literature reviews. *Medical writing*, v. 24, n. 4, p. 230-235, 2015.
- FRAGA-LAMAS, Paula; FERNÁNDEZ-CARAMÉS, Tiago M. A review on blockchain technologies for an advanced and cyber-resilient automotive industry. *IEEE access*, v. 7, p. 17578-17598, 2019.
- FREITAS, L. C.; BESEN, G. R.; JACOBI, P. R. Panorama da implementação da política nacional de resíduos sólidos: resíduos urbanos. In: *Política nacional de resíduos sólidos – implementação e monitoramento de resíduos urbanos*. Organizadores: Gina Rizpah Besen; Luciana Freitas; Pedro Roberto Jacobi. São Paulo: IEE / USP & OPNRS, p.11-33, 2017.
- GANESH, NS Gowri; VENKATESH, NG Mukunth. The Industry 4.0 for Secure and Smarter Manufacturing. In: *Advancing Smarter and More Secure Industrial Applications Using AI, IoT, and Blockchain Technology*. IGI Global, 2022. p. 153-175.
- GEISENDORF, Sylvie; PIETRULLA, Felicitas. The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, v. 60, n. 5, p. 771-782, 2018.
- HALLINGBERG, Britt et al. Exploratory studies to decide whether and how to proceed with full-scale evaluations of public health interventions: a systematic review of guidance. *Pilot and feasibility studies*, v. 4, p. 1-12, 2018.
- IBRACON. NPA 11 - Normas de procedimentos de auditoria ambiental - Balanço e ecologia. São Paulo: Ibracon, 1996. Disponível em: <http://www.ibracon.com.br/>. Acesso em: 18/12/2020.
- INDÚSTRIA 4.0 - PANORAMA DA INOVAÇÃO. Publicações FIRJAN – Cadernos SENAI de inovação, 2016.
- INOUE, J. S. P.; BITTENCOURT, M. V. A. R.; PINTO, S. B.; GERIBELLO, R. S.; AMARANTE, M. S. Indústria 4.0 – Impactos da tecnologia da informação na nova indústria. *Pesquisa e Ação*, v. 5, n.1, Junho de 2019. ISSN 2447-0627.
- JABBOUR, Charbel Jose Chiappetta et al. First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies. *Resources policy*, v. 66, p. 101596, 2020.
- KLINGENBERG, Cristina Orsolin; BORGES, Marco Antônio Viana; DO VALE ANTUNES JR, José Antônio. Industry 4.0: What makes it a revolution? A historical framework to understand the phenomenon. *Technology in Society*, v. 70, p. 102009, 2022.
- KOPP, Ralf; HOWALDT, Jürgen; SCHULTZE, Jürgen. Why Industry 4.0 needs Workplace Innovation: a critical look at the German debate on advanced manufacturing. *European Journal of Workplace Innovation*, v. 2, n. 1, 2016.
- LEI 12.305 DE 02 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólido. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 27/04/2021.
- LEWANDOWSKI, Mateusz. Designing the business models for circular economy—Towards the conceptual framework. *Sustainability*, v. 8, n. 1, p. 43, 2016.
- LU, Yuqian et al. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 61, p. 101837, 2020.
- LUCAS, M. A.; SOUSA, K. A.; RAMOS, I. J.; REGO, C. Desenvolvimento sustentável, circular e educação empreendedora. In: *Pesquisa em inovação: múltiplos olhares rumo a uma convergência formativa*. Organizador: Gilson Pôrto Junior. Palmas: EDUFT, p.13-30, 2019.
- MITTAL, Sameer et al. A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of manufacturing systems*, v. 49, p. 194-214, 2018.
- MONOSTORI, László et al. Cyber-physical systems in manufacturing. *Cirp Annals*, v. 65, n. 2, p. 621-641, 2016.
- MUGARZA, Imanol; PARRA, Jorge; JACOB, Eduardo. Software updates in safety and security co-engineering. In: *Computer Safety, Reliability, and Security: SAFECOMP 2017 Workshops, ASSURE, DECSoS, SASSUR, TELERISE, and TIPS*, Trento, Italy, September 12, 2017, Proceedings 36. Springer International Publishing, 2017. p. 199-210.
- OTTONICAR, S. L. C.; VATENTIM, M. L. P. MOSCONI, E. Políticas públicas aplicadas à indústria 4.0: estudo comparativo entre o Brasil e o Canadá com foco na competência em informação. *RICI Revisa Íbero-Americana de Ciência da Informação*, v.12, n.2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26512/rici.v12.n2.2019.19596>.

- PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; RESENDE, Luis Mauricio. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. *Scientometrics*, v. 105, p. 2109-2135, 2015.
- PAPAZOGLU, Mike P.; VAN DEN HEUVEL, Willem-Jan. Service oriented architectures: approaches, technologies and research issues. *The VLDB journal*, v. 16, p. 389-415, 2007.
- PATI, Debajyoti; LORUSSO, Lesa N. How to write a systematic review of the literature. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, v. 11, n. 1, p. 15-30, 2018.
- RIBEIRO, V. C.; FERREIRA, E. A.; LYRA, J. R. M.; SANTOS, E. J.; SOUSA, J. G. Contabilidade ambiental: visão teórica, definição e tendências. *JNT - Facit Business and Technology Journal*, v. 1, n. 1, 2017. Disponível em: <http://revistas.faculdadefacit.edu.br/index.php/JNT/article/view/136>. Acesso em: 30/06/2021.
- ROSSIT, Daniel Alejandro; TOHMÉ, Fernando; FRUTOS, Mariano. Industry 4.0: smart scheduling. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 12, p. 3802-3813, 2019.
- SCHYNS, Zoé OG; SHAVER, Michael P. Mechanical recycling of packaging plastics: A review. *Macromolecular rapid communications*, v. 42, n. 3, p. 2000415, 2021.
- SILVA, C. L.; FUGII, G. M; BIERNISAKI, I.; MYSCZSUK, A. P. Indicadores multidimensionais das políticas de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos das capitais brasileiras: panorama de 2008 a 2014. In: *Política nacional de resíduos sólidos – implementação e monitoramento de resíduos urbanos*. Organizadores: Gina Rizpah Besen; Luciana Freitas; Pedro Roberto Jacobi. São Paulo: IEE / USP & OPNRS, p.34-53, 2017.
- SPUTNIK BRASIL. Indústria 4.0: Brasil está muito atrasado e leva muito pouco a sério esse debate, diz especialista. Disponível em: <https://br.sputniknews.com/brasil/2021080917879990-industria-40-brasil-esta-muito-atrasado-e-leva-muito-pouco-a-serio-esse-debate-diz-especialista/>. Acesso em: 09/08/2021.
- XU, Li Da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.
- TEIXEIRA, Cynthia Helena Soares Bouças; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. CONVERGENCES BETWEEN CIRCULAR ECONOMY AND INDUSTRY 4.0 PRACTICES. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 16, n. 2, p. 1-18, 2022.
- TEIXEIRA, C. H. S. B.; TEIXEIRA, R. L. P. Cenário da indústria 4.0 e a gestão da qualidade. *Engenharia 4.0: a era da produção inteligente*. 1ª ed. São Luís / MA: Editora Pascal, 2021, v. 5, p. 175-183.
- TEIXEIRA, C. H. S. B. A economia circular na era da 4ª revolução industrial: uso da tecnologia rumo à transição. Monografia (Especialização em Administração de Empresas, Curso de Especialização em Gestão Estratégica), Escola de Economia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Repositório Institucional da UFMG, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/38579>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- TEIXEIRA, R. L. P.; TEIXEIRA, C. H. S. B.; BRITO, M. L. A.; SILVA, P. C. D. Desafios da siderurgia na Indústria 4.0 no Brasil. *Gestão da produção em Foco*. 1ª ed.: Editora Poisson, 2020, v.42, p. 148-158.
- TORKUL, Orhan; SELVI, İhsan Hakan; ŞIŞCI, Merve. Smart seru production system for Industry 4.0: a conceptual model based on deep learning for real-time monitoring and controlling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, p. 1-23, 2022.
- VEZZOSI, Monica. Doctoral students' information behaviour: an exploratory study at the University of Parma (Italy). *New Library World*, v. 110, n. 1/2, p. 65-80, 2009.
- YAN, Jihong et al. Industrial big data in an industry 4.0 environment: Challenges, schemes, and applications for predictive maintenance. *Ieee Access*, v. 5, p. 23484-23491, 2017.