



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO NA ECONOMIA CIRCULAR PARA INDÚSTRIA 4.0: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

DOUGLAS OLIVEIRA PEDROZO - douglas.pedrozo@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP- BAURU-FEB

DELMIR PEIXOTO DE AZEVEDO JÚNIOR - delmir.azevedo@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP- BAURU-FEB

NEHEMIAS ANASTÁCIO SANTOS DA SILVA - nehemias.silva@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP- BAURU-FEB

ALEXANDRE SILVA SANTOS - alexandre.s.santos@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP- BAURU-FEB

REGIANE MÁXIMO SIQUEIRA - regiane.maximo@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ÁREA: 3. PESQUISA OPERACIONAL
SUBÁREA: 3.3 – PROCESSOS DECISÓRIOS

RESUMO: A INDÚSTRIA 4.0 TROUXE GRANDES AVANÇOS PARA A MANUTENÇÃO DA SOCIEDADE, TODAVIA, A ECONOMIA CIRCULAR TEM SIDO DISCUTIDA COMO COMPLEMENTO DESSE PROGRESSO. O OBJETIVO DESTES ARTIGOS É CONDUZIR UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA UTILIZANDO O MÉTODO PRISMA, FOCANDO EM LISTAR OS MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO QUE SÃO APLICADOS EM ESTUDOS SOBRE SUSTENTABILIDADE NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0. ESTE ESTUDO DE REVISÃO FOI REALIZADO MEDIANTE BUSCA DE ARTIGOS NAS BASES DE DADOS WEB OF SCIENCE E SCOPUS SEGUINDO AS DIRETRIZES PRISMA. FORAM SELECIONADOS 17 ARTIGOS, FOI POSSÍVEL OBSERVAR QUE OS PESQUISADORES TÊM SE IMPORTADO EM BUSCAR RESULTADOS SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DA I4.0 JUNTAMENTE COM A SUSTENTABILIDADE E PARA ISSO, OS MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO TÊM AUXILIADO NESSE PROCESSO. VÁRIOS MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO TÊM SIDO TESTADOS, ISOLADAMENTE OU EM CONJUNTOS COM OUTROS, DESTACANDO-SE NESSE ESTUDO, A UTILIZAÇÃO DO BWM E O DMATEL. VALE DESTACAR QUE OS ESTUDOS APONTAM UMA APLICAÇÃO AMPLA DOS MÉTODOS MULTICRITÉRIOS DE APOIO A DECISÃO EM DIFERENTES SETORES COMO HOSPITALAR, TÊXTIL, ELETRÔNICOS, DENTRE OUTROS.

PALAVRAS-CHAVES: SUSTENTABILIDADE; ECONOMIA CIRCULAR, INDÚSTRIA 4.0; MÉTODOS MULTICRITÉRIOS DE APOIO A DECISÃO.

1. INTRODUÇÃO

A transição para um modelo de economia circular, onde os recursos são reutilizados, reciclados e valorizados continuamente, representa um dos principais desafios e objetivos das sociedades modernas. Esse novo paradigma contrasta com o modelo linear tradicional de "extrair, produzir, descartar". Na economia circular, o foco está em minimizar o desperdício e otimizar o uso dos recursos, impulsionando práticas sustentáveis que não só protegem o meio ambiente, mas também incentivam a inovação.

Com o advento da Indústria 4.0, a integração de tecnologias avançadas como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA), big data e manufatura aditiva está acelerando a adoção dos princípios da economia circular nos processos industriais Delpla et al. (2022). Esse avanço não apenas melhora a eficiência dos recursos, mas também abre novas oportunidades para o desenvolvimento de soluções ambientalmente responsáveis e economicamente viáveis. Essa evolução não é apenas uma mudança nos métodos de produção, mas representa um movimento em direção a um futuro mais sustentável e resiliente, onde a inovação e a conscientização ambiental se combinam para criar um mundo melhor para as gerações futuras (RAJPUT; SINGH, 2019)

Para Lei et al (2023) a Indústria 4.0 marca o surgimento da quarta revolução industrial, onde a digitalização e a interconexão dos processos produtivos são as protagonistas. Essa transformação digital não apenas permite a coleta e análise de grandes volumes de dados, mas também viabiliza decisões instantâneas e aprimoramento contínuo dos procedimentos. Na opinião de Chauhan et al. (2021) ao integrarem os princípios da economia circular com as tecnologias da Indústria 4.0, as organizações podem alcançar níveis mais altos de eficiência, sustentabilidade e competitividade. Entretanto, a complexidade dessa integração requer abordagens robustas para apoiar a tomada de decisão, garantindo a gestão e otimização eficazes das múltiplas variáveis e interdependências envolvidas. Essa combinação não só impulsiona o progresso industrial, mas também abre caminho para soluções que promovem um futuro mais inteligente e sustentável para todos.

Os métodos de apoio à tomada de decisão desempenham um papel fundamental na análise e implementação de estratégias de economia circular na era da Indústria 4.0. Essas abordagens fornecem ferramentas analíticas para avaliar diferentes opções, prever impactos e maximizar o uso eficiente dos recursos disponíveis. Métodos como análise multicritério, simulação, otimização matemática e análise de cenários são amplamente utilizados para auxiliar em decisões complexas, assegurando que as escolhas feitas não só promovam a

sustentabilidade, mas também sejam economicamente viáveis. Essas ferramentas não apenas facilitam a tomada de decisão estratégica, mas também contribuem para um processo decisório mais informado e responsável, alinhado com os princípios de um desenvolvimento industrial sustentável e orientado para o futuro (KUSI et al., 2021).

Para explorar como esses métodos de apoio à decisão estão sendo aplicados em estudos sobre economia circular na era da Indústria 4.0, realizamos uma revisão sistemática da literatura. Esse tipo de revisão nos proporciona uma visão ampla e imparcial do estado atual do conhecimento, destacando áreas que precisam de mais investigação, identificando tendências emergentes e compartilhando as melhores práticas encontradas. Nesse contexto, o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) se destaca como uma ferramenta essencial para conduzir revisões sistemáticas robustas e bem estruturadas (HANNAH, 2019).

Essa abordagem não só nos ajuda a compreender melhor como os métodos analíticos estão sendo aplicados na interseção entre economia circular e Indústria 4.0, mas também nos orienta na busca por insights valiosos que possam impulsionar avanços significativos nessa área crucial para o futuro da indústria e da sustentabilidade ambiental. Uma revisão sistemática da literatura com PRISMA pode oferecer uma visão abrangente e detalhada do estado da arte, identificando tendências emergentes, lacunas no conhecimento e melhores práticas (HANNAH, 2019).

Ao mapear a literatura existente, esta revisão busca responder a várias questões fundamentais: Quais são os métodos de apoio à decisão mais utilizados na implementação da economia circular na Indústria 4.0? Como esses métodos estão sendo aplicados em diferentes setores industriais? Quais são os principais desafios e oportunidades identificados pelos pesquisadores? Ao abordar essas questões, espera-se contribuir para uma compreensão mais profunda e abrangente de como os métodos de apoio à decisão podem facilitar a transição para uma economia mais circular e sustentável no contexto da Indústria 4.0.

Portanto, o objetivo deste artigo é conduzir uma revisão sistemática da literatura utilizando o método PRISMA, focando em entender como os métodos de apoio à decisão contribuem em projetos de economia circular que implementam tecnologias da indústria 4.0. Nosso propósito é destacar as principais descobertas, metodologias utilizadas e áreas de aplicação desses métodos. Com isso, buscamos oferecer uma visão detalhada e estruturada do estado atual da pesquisa, enfatizando as contribuições mais significativas, as tendências emergentes e os desafios enfrentados por pesquisadores e profissionais que exploram essa interseção de campos. A combinação da economia circular com as tecnologias da Indústria

4.0, apoiada por métodos robustos de tomada de decisão, pode representar um caminho promissor para a construção de sistemas produtivos mais sustentáveis e eficientes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sustentabilidade

A sustentabilidade tem se tornado cada vez mais relevante no contexto atual, impulsionando a busca por práticas e estratégias que promovam a preservação do meio ambiente e o uso eficiente dos recursos naturais. Nesse sentido, conceitos como economia circular, gerenciamento de resíduos e logística reversa têm ganhado destaque como abordagens fundamentais para alcançar um desenvolvimento sustentável.

A sustentabilidade propõe uma nova forma de pensar a produção e o consumo, baseada na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e produtos. Ao contrário do modelo linear tradicional, em que os recursos são extraídos, utilizados e descartados, a economia circular busca fechar o ciclo, mantendo os materiais em uso pelo maior tempo possível, minimizando o desperdício e as externalidades negativas ao meio ambiente.

O principal objetivo da economia circular é alcançar níveis de consumo e produção sustentáveis (SPC) através da produção mais limpa (CP) e da gestão do ciclo de vida do produto (PLC), a fim de criar harmonia entre o desenvolvimento econômico e a proteção ambiental (GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021). Com o aumento da população mundial, a gestão de resíduos está se tornando uma tarefa desafiadora tanto para os países desenvolvidos como para os países em desenvolvimento.

A incapacidade de rastrear os resíduos diários criados nas cidades e sua coleta e segregação eficazes é um desafio (KHAN; ALI, 2022). O gerenciamento de resíduos é, portanto, uma área que visa minimizar o impacto ambiental decorrente da geração e descarte de resíduos sólidos. Envolve a implementação de práticas e políticas para a coleta seletiva, tratamento adequado e disposição final dos resíduos, levando em consideração aspectos como a redução da quantidade de resíduos gerados, a reciclagem e a valorização dos materiais, bem como a adoção de tecnologias mais limpas e sustentáveis.

Uma das estratégias para esse enfrentamento tem sido a logística reversa, que se refere ao processo de retorno de produtos, embalagens e materiais ao ciclo produtivo, após seu uso, com o objetivo de reaproveitamento, reciclagem ou tratamento adequado. Logística reversa é uma modalidade de gestão da cadeia de suprimentos cujo objetivo é otimizar os fluxos retrógrados de mercadorias do ponto de consumo até o ponto de origem, a fim de

planejar, implementar e controlar de forma eficiente e eficaz o descarte adequado de materiais, produtos finais, e estoques, ou recuperar seu valor por meio de revenda, reforma, reparo, remanufatura ou reciclagem (KRSTI' et al., 2022a).

Ela abrange desde a coleta dos resíduos até sua destinação final, envolvendo ações como a coleta seletiva, a triagem, a desmontagem, o transporte reverso e o tratamento dos materiais, de forma a reduzir os impactos ambientais e promover a reintegração dos recursos no sistema produtivo (KRSTI' et al., 2022a).

2.2 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 refere-se à quarta revolução industrial, que começou no início do século XXI. Pode ser considerado um arranjo sistemático onde vários equipamentos físicos são incorporados com as mais recentes tecnologias, como sensores e dispositivos RFID, juntamente com tecnologias como IoT, análise de big data, inteligência artificial, impressão 3D, entre outras (GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021). O Quadro 1 apresenta algumas das principais tecnologias da indústria 4.0.

QUADRO 1 – Principais tecnologias da indústria 4.0

Tecnologia	Descrição
Blockchain	O Blockchain é uma tecnologia que permite o registro e compartilhamento seguro de informações de forma descentralizada. Essa tecnologia pode ser aplicada em pesquisas científicas para garantir a autenticidade e a integridade dos dados, bem como facilitar a rastreabilidade e transparência em cadeias de suprimentos e processos de produção. No contexto da sustentabilidade, o Blockchain pode ser utilizado para registrar informações sobre a origem sustentável de produtos, como certificações de energia renovável, redução de emissões de carbono ou práticas de responsabilidade social corporativa (JAMWAL et al., 2022).
IOT	A IoT permite a coleta de dados em tempo real de sensores e dispositivos conectados, possibilitando o monitoramento e controle de processos industriais de forma mais eficiente. Isso pode ajudar a identificar e reduzir o consumo de recursos naturais, otimizar a produção e minimizar desperdícios (GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021).
Inteligência Artificial	A IA pode ser aplicada em diversas áreas para melhorar a sustentabilidade, como otimização de processos, previsão de demanda, eficiência energética e redução de emissões de gases de efeito estufa. Algoritmos de IA podem ajudar a identificar padrões e tomar decisões mais inteligentes em relação ao uso de recursos (GHOREISHI et al., 2019).
Impressão 3D	A manufatura aditiva oferece a possibilidade de produzir peças e produtos de forma mais eficiente, utilizando menos matéria-prima e energia. Isso pode reduzir o desperdício e contribuir para a sustentabilidade ao longo do ciclo de vida do produto. Envolve a adição de matéria-prima em camadas microscópicas usando uma impressora 3-D. Ao contrário da tradicional fabricação, que envolve a subtração de material da matéria-prima, essas tecnologias envolvem quase nenhum desperdício (GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021).

Fonte: dos autores.

As soluções da Indústria 4.0 têm sido identificadas como fatores disruptivos no domínio da economia circular rumo a processos de produção mais limpos (KRSTI' et al.,

2022a). Por exemplo, alguns estudos relataram os benefícios das tecnologias e práticas I4.0 para reduzir as emissões de carbono e manter a sustentabilidade ambiental (JAMWAL et al., 2022).

Entretanto, existe uma multiplicidade de incertezas relacionadas com a transição efetiva de uma economia linear para uma economia circular, especialmente quando são levadas em consideração restrições e variáveis que estão relacionadas com fatores ambientais e econômicos (JAYAKUMAR et al., 2020). Portanto, como essas tecnologias diferem em relação ao grau de impacto e à extensão dos efeitos que geram muitos estudos têm utilizados métodos multicritério de apoio à decisão para auxiliar na compreensão de seus impactos em práticas sustentáveis.

2.3 Métodos de Apoio à Decisão

A tomada de decisão é um aspecto fundamental em diversos contextos, desde a gestão de negócios até a formulação de políticas públicas. No entanto, muitas vezes os profissionais de diversas áreas se deparam com situações complexas e com múltiplos critérios a serem considerados, o que torna o processo de escolha desafiador. Nesse sentido, os métodos multicritério de apoio à decisão têm se mostrado ferramentas eficazes para lidar com a complexidade e a incerteza inerentes a esses problemas (GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021). O Quadro 2 apresenta alguns dos métodos mais citados dos estudos desta revisão.

QUADRO 2 - Métodos de apoio a decisão em estudos de sustentabilidade na indústria 4.0

Método	Breve descrição
BWM (Best Worst Method)	Usado para priorizar e derivar os pesos com base em comparações aos pares dos melhores e piores critérios, com os outros critérios (GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021). É uma abordagem que permite aos tomadores de decisão identificarem os melhores e piores critérios em relação a um objetivo específico, fornecendo uma estrutura clara para a análise dos critérios e a priorização das alternativas.
Modelo de programação linear mista multiobjetivo	Combina a otimização matemática com a consideração de múltiplos objetivos, utilizando variáveis inteiras e contínuas para representar as decisões e os critérios (JAYAKUMAR et al., 2020).
Fuzzy AHP	É uma extensão do AHP que leva em conta a incerteza e a subjetividade inerentes ao processo de tomada de decisão, permitindo a modelagem de informações imprecisas e ambíguas (KAZANCOGLU et al., 2021).
TODIM (Tomada de Decisão Interativa e Multicritério)	Se baseia em uma abordagem psicológica e interativa para lidar com problemas de decisão complexos, permitindo a interação entre os tomadores de decisão e o modelo (KAZANCOGLU et al., 2021).
SWARA (Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis)	Visa determinar a importância relativa dos critérios de decisão por meio de uma análise passo a passo, permitindo uma avaliação mais precisa e sistemática. A sua importância é considerada por sua capacidade de fornecer resultados mais precisos em comparação com outros métodos (KHAN; ALI, 2022).
Método Delphi	É uma abordagem que envolve a coleta de opiniões de um grupo de especialistas, permitindo a obtenção de um consenso ou uma visão ampla sobre um determinado problema de decisão (KRSTIĆ et al., 2022b).
Analytical Network Process (ANP)	É uma técnica que permite a modelagem e análise de dependências e interações entre critérios, considerando a influência mútua entre eles (KRSTIĆ et al., 2022b).
COMprehensive distance Based RANking (COBRA)	Utiliza a distância entre as alternativas e um perfil ideal para determinar a classificação das alternativas em relação aos critérios. A capacidade de considerar critérios que tenham medidas diferentes, a necessidade de intervenção mínima dos decisores, a estabilidade e facilidade de uso são as principais vantagens deste método (KRSTIĆ et al., 2022b).
AHP (Analytic Hierarchy Process)	Este método permite a solução de problemas através da análise de interações simultâneas de numerosos fatores em um ambiente complexo e não estruturado (OGUZTIMUR, 2011).

Fonte: dos autores.

3. MÉTODO

O protocolo de revisão adotou as diretrizes do PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) para assegurar transparência e rigor metodológico durante todo o processo de análise da literatura de acordo com Hannah (2019). A pergunta principal que norteou esta revisão foi cuidadosamente formulada para garantir a inclusão dos estudos mais pertinentes e relevantes para o tema em questão.

A Estratégia de Busca das bases e dados utilizados neste trabalho foram as plataformas Scopus e *Web of Science*, onde foram feitas combinações de palavras-chave relacionadas à economia circular, indústria 4.0 e métodos de apoio à decisão para garantir a abrangência e relevância dos resultados encontrados.

A busca de publicações científicas foi realizada em maio de 2024. Como ponto de partida, foram definidos o conjunto de palavras-chave a considerar nas buscas eletrônicas: "industr* 4.0" OR "manufactur* of the future" OR "future manufactur*" OR "advanced manufactur* technolog*" OR "smart* factor*" OR "smart* manufactur*" OR "smart Industr*" OR "smart compan*" OR "industr* 5.0" OR "digitalization" AND "circular economy" OR "recycling" OR "Circular ecosystem" AND "Multi-Criteria Decision".

Os critérios de inclusão e exclusão foram definidos de modo a estabelecer critérios claros para a seleção dos estudos, incluindo tipos de publicação, idioma, ano de publicação e relevância para o tema. Foram definidas as áreas Business, Management, Engineering, Environmental Science, Energy e Computer Science. Como critérios de inclusão, foram incluídos artigos científicos no idioma inglês, publicados nos últimos 5 anos (2019 a 2024).

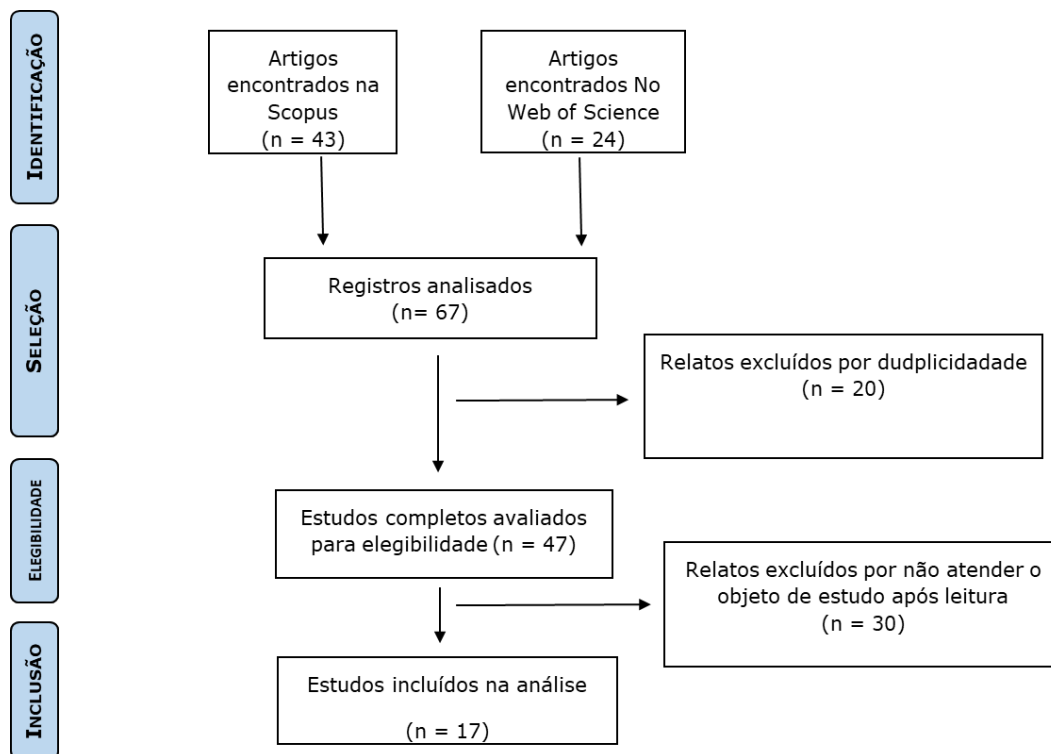
No que diz respeito à triagem e seleção dos artigos encontrados, foram realizadas leituras completas dos artigos selecionados para determinar sua adequação final com base nos critérios de inclusão e extrair dados relevantes com base nos títulos e resumos dos trabalhos encontrados, eliminando os estudos que claramente não atendem aos critérios de inclusão. Foram selecionados inicialmente 67 artigos para avaliação e com a aplicação da elegibilidade restaram 17 artigos para leitura na íntegra e discussão. Para essa seleção, os artigos elegíveis contendo o número de vezes que foram citados foram exportados para o Excel, onde foi possível ordená-los em ordem de acordo com o número de citações.

Esta revisão foi organizada em cinco etapas distintas: 1) definição clara do tema a ser explorado; 2) desenvolvimento de estratégias de busca para seleção de amostras adequadas; 3) revisão criteriosa e em pares dos estudos para composição da amostra e extração de dados; 4)

avaliação rigorosa dos estudos incluídos; 5) interpretação cuidadosa dos resultados obtidos, acompanhado de uma análise crítica dos achados encontrados.

Com a aplicação da elegibilidade restaram 17 artigos para leitura na íntegra e discussão nesse estudo (Figura 1).

FIGURA 1 – Fluxograma adaptado da diretriz PRISMA.



Fonte: dos autores, realizado de acordo com as diretrizes PRISMA (HANNAH, 2019)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A maioria dos artigos selecionados foram publicados no ano de 2022, representando um total de 53% dos documentos analisados (Quadro 3).

Dentre os autores, verificou-se que Agnusdei, G. P.; Krstić, M.; Miglietta, P. P. e Tadić, S. (KRSTIĆ et al., 2022a, 2022b) participaram da autoria de dois artigos, ambos publicados em 2022 (Quadro 3).

QUADRO 3 – Características dos artigos selecionados

Autores	Ano	Objetivo
Çil, Z.A., Öztóp, H., Kenger, Z.D., Kizilay, D.	2023	Apresentar o problema integrado de balanceamento de linha de desmontagem distribuída e roteamento de veículos.
Govindan, K.	2023	Explorar a transformação da economia circular inteligente através da digitalização. Selecionar práticas de economia circular que tenham um grande impacto nos ODS e no Net Zero .
Tripathy, A., Bhuyan, A., Padhy, R.K., Mangla, S.K., Roopak, R .	2023	Aborda a reciclagem de baterias de íons de lítio (LIBs) e explora os seus principais impulsionadores.
Daultani, Y., Cheikhrouhou, N., Pratap, S., Prajapati, D.	2022	Propor um novo projeto de rede logística direta e reversa (FRLND), juntamente com uma facilidade de coleta e demanda do consumidor dentro da janela de tempo prometida e abordar as complexidades relacionadas a plataformas de comércio eletrônico, fornecedores, fabricantes, provedores logísticos terceirizados, varejistas e clientes.
Delpla, V., Kenné, J.P., Hof, L.A.	2022	Propor um modelo cadeias de abastecimento de circuito fechado - CLSC que maximiza o lucro total da empresa manufatureira, selecionando o tratamento a ser aplicado aos produtos coletados de acordo com sua condição estimada pela coleta de dados do ciclo de vida possibilitada pela IoT.
Eldrandaly, K.A., El Saber, N., Mohamed, M., Abdel-Basset, M.	2022	Propor uma estrutura de decisão multicritério (MCDM) baseada no melhor-pior método (BWM), ensaio de tomada de decisão e laboratório de avaliação (DEMATEL), técnica para ordem de preferência por similaridade com o ideal de solução (TOPSIS) e Avaliação Proporcional Complexa (COPRAS).
Xie, Z.; Tian, G.; Tao, Y.	2022	Desenvolver uma estrutura de critérios de seleção de fornecedores verdes, identificando e refinando iniciativas da Indústria 4.0 baseadas na economia circular dentro dos procedimentos de uma cadeia de abastecimento sustentável.
Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M.	2022	Identificar os desafios críticos e desafios da I4.0 e medidas de soluções baseadas na economia circular para superar os problemas do blockchain que possibilitam a fabricação sustentável.
Khan, F., Ali, Y.	2022	Fornecer uma estrutura facilitadora para a adoção de uma gestão inteligente de resíduos no contexto da CE para o Paquistão.
Krstić, M., Agnusdei, G.P., Miglietta, P.P., Tadić, S.	2022a	Hierarquizar as principais áreas de interesse da economia circular em termos de aplicação das tecnologias da indústria 4.0 para a realização das atividades logísticas no setor agroalimentar.
Krstić, M., Agnusdei, G.P., Miglietta, P.P., Tadić, S., Roso, V.	2022b	Avaliar a aplicabilidade de diversas tecnologias da Indústria 4.0 no setor de logística reversa -RL, a fim de apontar os mais aplicáveis
Pamučar, D., Behzad, M., Janosevic, M., Aburto, A.C.A.	2022	Identificar barreiras comuns na conversão de resíduos agrícolas em materiais e produtos de construção no sector agrícola, transporte e indústria transformadora.
Chauhan, A., Jakhar, S.K., Chauhan, C.	2021	Analisar os impulsionadores interligados da indústria 4.0 e da economia circular para auxiliar o desenvolvimento de um sistema inteligente de eliminação de resíduos de saúde.
Shang, C., Saeidi P., Goh, C.F.	2021	Avaliar as barreiras relacionadas aos CSCs na era da transição da Indústria 4.0.
Gupta, H., Kumar, A., Wasan, P.	2021	Desenvolver uma estrutura baseada em conceitos de economia circular, produção sustentável mais limpa e padrões da Indústria 4.0
Jayakumar, J.K.J., Kek, V., Hasibuan, S.	2020	Desenvolver e otimizar um modelo matemático baseado em uma estrutura que integra conceitos-chave relacionados a uma economia circular e economia compartilhada para um fabricante de laptops.
Rajput, S., Singh, S.P.	2020	Propor um modelo de programação linear inteira mista (MILP) para a configuração da Indústria 4.0 para alcançar a economia circular e a produção mais limpa, otimizando a alocação produtos-máquinas.

Fonte: dos autores

A economia circular alinhada às questões da indústria 4.0 tem sido amplamente discutida nos últimos anos, principalmente devido a implementação da indústria 5.0, que tem como essência três determinantes do desenvolvimento: desenvolvimento centrado no ser

humano, desenvolvimento sustentável e resiliente (LONGO et al., 2020). Nesse sentido as publicações que envolvem estes temas vêm crescendo consideravelmente, demonstrando o interesse dos pesquisadores em buscar novos resultados em diferentes áreas para contribuir com desenvolvimento industrial.

A implantação da inovação nas indústrias são fatores de diferenciação e distinção organizacional, imputando às empresas implicações para um modelo competitivo. Por meio deste processo ocorre a digitalização da atividade organizacional fundidas do mundo virtual com o real, facilitando assim o processo, no qual é caracterizada pela integração e controle da inteligência artificial (KORTELING et al., 2021).

Os estudos abordaram sobre diferentes tipos de indústrias, como do setor hospitalar (CHAUHAN et al., 2021), têxtil (GOVINDAN, 2023), eletrônicos (DAULTANI et al., 2022; JAMWAL et al., 2022; JAYAKUMAR et al., 2020), agroalimentar (KRSTIĆ et al., 2022a) e construção (PAMUČAR et al., 2022). Porém, a maioria dos artigos relatavam sobre a indústria em geral (Quadro 4).

Já sobre o que é abordado de sustentabilidade e economia circular nos artigos, verifica-se que as definições mais citadas foram: economia circular (JAYAKUMAR et al., 2020; GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021; SHANG et al., 2021; JAMWAL et al., 2022; KRSTIĆ et al., 2022a); reciclagem de materiais (CHAUHAN et al., 2021; DELPLA et al., 2022; PAMUČAR et al., 2022; ÇIL et al., 2023; TRIPATHY et al., 2023); logística reversa (DAULTANI et al., 2022; KRSTIĆ et al., 2022a; KRSTIĆ et al., 2022b); recuperação e reutilização de produtos (DELPLA et al., 2022; PAMUČAR et al., 2022) (Quadro 4).

A economia circular – EC é um modelo de negócio económico baseado na minimização do consumo finito de recursos limitados, substituindo o conceito de “fim de vida” e enfatizando o design de materiais, produtos e sistemas (KIRCHHERR et al., 2017). A EC visa fornecer ações e práticas como reutilização, reciclagem, reparo, ecodesign, reforma, remanufatura, recuperação do compartilhamento de produtos para produção e consumo sustentáveis (RODRIGUEZ-ANTON et al., 2019).

Já a logística reversa se refere aos conceitos de redução, reutilização, remanufatura e reciclagem de produtos devolvidos pelos clientes. Essa ação contribui para minimização de resíduos na produção, além de poder contribuir na fabricação de novo produtos, gerando diminuição de custos (HAZEN et al., 2011).

QUADRO 2 – Dados referentes ao setor avaliado, abordagem de sustentabilidade e métodos de tomada de decisão.

Autor	Setor avaliado	Abordagem sobre economia circular	Método utilizado para tomada de decisão
Chauhan et al. (2021)	Hospitalar	Reciclagem de material hospitalar	o método do Laboratório de Trilha e Avaliação de Decisão (DEMATEL)
Çil et al. (2023)	Produtos remanufaturados e cadeia de suprimentos	Reciclagem de materiais	DLB e VRP distribuídos integrados (I-DDLB-VRP)
Daultani et al. (2022)	Eletrônicos	Logística reversa	modelo de programação não linear inteira mista (MINLP)
Delpla et al. (2022)	Cadeia de abastecimento	Recuperação de produtos em fim de vida para reciclagem ou reutilização	CLSC
Eldrandaly et al. (2022)	Geral	Recuperação e manufatura de produtos	BWM, DEMATEL, TOPSIS E COPRAS
Govindan (2023)	Textil	ODS - desenvolvimento sustentável e emissões de carbono zero	Best-Worst Method (BWM) e o DEMATEL
Shang et al. (2021)	Geral	Trata de Economia Circular na melhoria da sustentabilidade	Método “Combined Compromise Solution (CoCoSo)” e do método “Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC)” no “q-Rung Orthopair Fuzzy Conjuntos (q-ROFSs).
Xie et al. (2022)	Geral	Seleção de fornecedores para melhoria da sustentabilidade	SIM
Tripathy et al. (2023)	Geral	Reciclagem LIB	Delphi e métodos de tomada de decisão multicritério
Gupta, Kumar e Wasan (2021)	Geral	Economia circular	Best-Worst Method (BWM)
Jamwal et al. (2022)	Indústria de eletrônicos	Economia circular	BWM-ELECTRE method
Jayakumar et al. (2020)	indústria de laptops	Economia de compartilhamento	A multi-objective mixed-integer linear programming model.
Khan e Ali (2022)	Não especificado	Gerenciamento de resíduos	Fuzzy Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and fuzzy VIšekriterijumsko kompromisno rangiranje (VIKOR)
Krstić et al. (2022a)	Setor agroalimentar	Logística na economia circular	Um modelo híbrido combinando o Analytical Hierarchy Proces (AHP) e o Comprehensive distance-Based RAnking (COBRA)
Krstić et al. (2022b)	Setor de logística reversa	Logística reversa	Um modelo combinando o best—worst method (BWM) e o comprehensive distance-based ranking (COBRA)
Pamučar et al. (2022)	Construção, indústria transformadora, transportes e agricultura	A conversão de resíduos agrícolas em produtos de construção	metodologia OPA pertence ao grupo de técnicas multicritério
Rajput e Singh (2020)	Industria 4.0 em Geral	Redução de energia e de materiais	modelo MILP

Fonte: dos autores

Rajput e Singh (2019) afirmam que a otimização de recursos, e consequentemente a promoção da sustentabilidade pode ser obtida por meio da reciclagem, reutilização de componentes e produtos e restauração dos insumos energéticos por um período mais longo, transformando as economias mundiais para serem mais sustentáveis e ecologicamente corretas.

Quanto aos métodos de tomada de decisão que foram citados nos artigos, merece destaque o Best-Worst Method - BWM (GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021; JAMWAL et al., 2022; ELDRANDALY et al., 2022; GOVINDAN, 2023) e o método do Laboratório de Trilha e Avaliação de Decisão - DEMATEL (CHAUHAN et al., 2021; ELDRANDALY et al., 2022; GOVINDAN, 2023) (Quadro 4).

Dentro de um contexto mercadológico cada vez mais complexo, as organizações e seus gestores precisam tomar decisões cada vez mais embasadas e fundamentadas em informações estruturadas. Assim, Araújo e Razzolini Filho (2017) discorrem que o aumento de informações diante do desenvolvimento tecnológico tem se tornado um desafio para as organizações, principalmente nos processos decisórios, pois deter a informação relevante no momento certo se tornou um diferencial competitivo.

Dentre os métodos de tomada de decisão, o BWM representa uma ferramenta poderosa para tomada de decisão multicritério e definição de coeficientes de peso dos critérios. No entanto, ao resolver problemas do mundo real, existem problemas específicos multicritérios onde vários critérios exercem a mesma influência na tomada de decisões. Nessas situações, os postulados tradicionais do BWM implicam a definição de um melhor critério e um pior critério dentro de um conjunto de critérios observados (DWIVEDI et al., 2021).

Rezaei (2015) desenvolveu o BWM para superar algumas deficiências do AHP, que antes de tudo dizem respeito a um grande número de comparações em pares de critérios. Um pequeno número de comparações em pares remove inconsistências durante a comparação de critérios. Isso exerce uma influência adicional na obtenção de resultados mais confiáveis (em relação ao AHP), uma vez que as relações de transitividade são menos prejudicadas, o que influencia ainda mais uma maior consistência dos resultados (PAMUČAR et al., 2020).

O DEMATEL também é um procedimento matemático utilizado para tomada de decisão, esse método foi desenvolvido por Gabus e Fontela (1976). Este método tem o mérito de abordar as questões sociais típicas. O DEMATEL auxilia na obtenção da prioridade dos critérios e converte a relação causa-efeito dos elementos em modelos estruturais visíveis (SAROHA et al., 2022).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria 4.0 sem dúvida trouxe um grande avanço para esse setor, todavia inicialmente as organizações não se atentaram nas questões ambientais e economia circular para sua manutenção. Assim, foi necessário rever esse processo, tendo início a revolução 5.0, da qual tem como um de seus principais princípios a sustentabilidade.

Portanto, para haja um melhor desenvolvimento industrial atrelado à economia circular, é indispensável que as organizações busquem melhores meios para tomada de decisão nas diferentes atuações da cadeia produtiva. Assim vários métodos podem ser aplicados com esse objetivo.

Nesse estudo foi possível observar que os pesquisadores têm se importado em buscar resultados sobre a implementação da I4.0 juntamente com a economia circular e para isso, os métodos de tomada de decisão têm auxiliado nesse processo. Vale destacar que os estudos apontaram essa preocupação em diferentes setores como hospitalar, têxtil, eletrônicos, dentre outros.

Por outro lado, vários métodos de tomada de decisão têm sido testados, isoladamente ou em conjuntos com outros, destacando-se nesse estudo, a utilização do BWM e o DMATEL.

Entretanto, os métodos de tomada de decisão organizacional voltados para a indústria 4.0 e economia circular é um tópico de pesquisa que necessita ainda de estudos para se obter melhores definições sobre sua aplicação na prática. Nesse sentido, vale ressaltar que cada segmento industrial possui suas particularidades, o que gera a necessidade de pesquisas em diferentes setores, envolvendo todos os ambientes.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. O.; RAZZOLINI FILHO, E. Os sistemas de informação como suporte à tomada de decisão estratégica. **Revista Competitividade e Sustentabilidade**, v. 4, n. 2, p. 66–75, 2017.

CHAUHAN, A.; JAKHAR, S. K.; CHAUHAN, C. The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, 123854, 2021.

ÇIL, Z. A. et al. Integrating distributed disassembly line balancing and vehicle routing problem in supply chain: Integer programming, constraint programming, and heuristic algorithms. **International Journal of Production Economics**, v. 265, 109014, 2023.

DAULTANI, Y. et al. Forward and reverse logistics network design with sustainability for new and refurbished products in E-commerce. **Operations and Supply Chain Management: An International Journal**, v. 15, n. 4, p. 540-550, 2022.

DELPLA, V.; KENNÉ, J. P.; HOF, L. A. Circular manufacturing 4.0: towards internet of things embedded closed-loop supply chains. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 1, p. 1-24, 2022.

DWIVEDI, R. et al. Performance evaluation of an insurance company using an integrated Balanced Scorecard (BSC) and Best-Worst Method (BWM). **Decision Making: Applications in Management and Engineering**, v. 4, n. 1, p. 33-50, 2021.

ELDRANDALY, K. A. et al. Sustainable manufacturing evaluation based on enterprise industry 4.0 technologies. **Sustainability**, v. 14, n. 12, 7376, 2022.

GABUS, A.; FONTELA, E. **World problems an invitation to further thought**. Geneva: Battelle Geneva Research Centre, 1972.

GHOREISHI, M.; HAPPONEN, A. Key enablers for deploying artificial intelligence for circular economy embracing sustainable product design: three case studies. In: **The 13th International Engineering Research Conference**, Eureka, 2019, p. 17, 2019.

GOVINDAN, K. How digitalization transforms the traditional circular economy to a smart circular economy for achieving SDGs and net zero. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 177, 103147, 2023.

GUPTA, H.; KUMAR, A.; WASAN, P. Industry 4.0, cleaner production and circular economy: An integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, 126253, 2021.

HANNAH, S. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 104, p. 333-339, 2019.

HAZEN, B. T.; CEGIELSKI, C.; HANNA, J. Diffusion of green supply chain management: Examining perceived quality of green reverse logistics. **International Journal of Logistic and Managment**, v. 22, p. 373-389, 2011.

JAMWAL, A.; AGRAWAL, R.; SHARMA, M. A framework to overcome blockchain enabled sustainable manufacturing issues through circular economy and industry 4.0 measures. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, v. 7, n. 6, p. 764-790, 2022.

JAYAKUMAR, J. K. J.; KEK, V.; HASIBUAN, S. Modelling of sharing networks in the circular economy. **Journal of Modelling in Management**, v. 15, n. 2, p. 407-440, 2020.

KAZANCOGLU, Y. et al. Framework for a sustainable supply chain to overcome risks in transition to a circular economy through Industry 4.0. **Production Planning & Control**, v. 34, n. 10, p. 902-917, 2021.

KHAN, F.; ALI, Y. A facilitating framework for a developing country to adopt smart waste management in the context of circular economy. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 18, p. 26336-26351, 2022.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceituando a economia circular: uma análise de 114 definições. **Recursos, Conservação e Reciclagem**, v. 127, p. 221-232, 2017.

KORTELING, J. H. et al. Human-versus artificial intelligence. **Frontiers in Artificial Intelligence**, v. 4, 622364, 2021.

KRSTIĆ, M. et al. Logistics 4.0 toward circular economy in the agri-food sector. **Sustainable Futures**, v. 4, 100097, 2022a.

KRSTIĆ, M. et al. Applicability of industry 4.0 technologies in the reverse logistics: a circular economy approach based on comprehensive distance based ranking (COBRA) method. **Sustainability**, v. 14, n. 9, 5632, 2022b.

KUSI, S. et al. Sustainable supplier selection based on industry 4.0 initiatives within the context of circular economy implementation in supply chain operations. **Production Planning & Control**, v. 34, p. 1-12, 2021.

LEI, Z. et al. How do different Industry 4.0 technologies support certain Circular Economy practices?. **Industrial Management & Data Systems**, v. 123, p. 1-9, 2023.

LONGO, G. O.; CORREIA, L. F. C.; MELLO, T. J. Coral recovery after a burial event: insights on coral resilience in a marginal reef. **Marine Biodiversity**, v. 50, n. 6, p. 92-99, 2020.

OGUZTIMUR, S. Why fuzzy analytic hierarchy process approach for transport problems? In: **Proceedings of the 51st Congress of the European Regional Science Association: "New Challenges for European Regions and Urban Areas in a Globalised World"**, Barcelona, Spain, 2011, 30 August - 3 September 2011.

PAMUČAR, D. et al. A Multi-Criteria Decision-Making framework for prioritizing and overcoming sectoral barriers in converting agricultural residues to a building Material. **Mathematics**, v. 10, n. 21, 4003, 2022.

PAMUČAR, D. Application of improved best worst method (BWM) in real-world problems. **Mathematics**, v. 8, n. 8, 1342, 2020.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Conectando economia circular e indústria 4.0. **International Journal of Information Management**, v. 49, p. 98-113, 2019.

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method. **Omega**, v. 53, p. 49-57, 2015.

RODRIGUEZ-ANTON, J. M. et al. Análise das relações entre economia circular e objetivos de desenvolvimento sustentável. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 26, n. 8, p. 708-720, 2019.

SAROHA, M.; GARG, D.; LUTHRA, S. Identification and analysis of circular supply chain management practices for sustainability: a fuzzy-DEMATEL approach. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 71, n. 3, p. 722-747, 2022.

SHANG, C.; SAEIDI, P.; GOH, C. F. Evaluation of circular supply chains barriers in the era of Industry 4.0 transition using an extended decision-making approach. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 35, n. 4/5, p. 1100-1128, 2022.

TRIPATHY, A. et al. Drivers of lithium-ion batteries recycling industry toward circular economy in industry 4.0. **Computers & Industrial Engineering**, v. 179, 109157, 2023.

XIE, Z.; TIAN, G.; TAO, Y. A Multi-Criteria Decision-Making Framework for Sustainable Supplier Selection in the Circular Economy and Industry 4.0 Era. **Sustainability**, v. 14, n. 24, 16809, 2022.