

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS PARA O ALCANCE DE UM ECOSISTEMA CIRCULAR NA CADEIA DE VALOR FOTOVOLTAICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica, apesar de ser considerada limpa, tem gerado preocupações ambientais. Painéis fotovoltaicos à base de silício, os mais utilizados no mercado atualmente, possuem uma vida útil de 25 a 30 anos (Hoseinpur *et al.*, 2023), o que pode gerar 8 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos no ano de 2030 e 80 milhões de toneladas até 2050 (Lee; Duffy; Allen, 2025). Para Spellmeier *et al.* (2025) este fato é alarmante, pois a indústria fotovoltaica segue um modelo de economia linear, onde os produtos são fabricados, utilizados e descartados. Por este motivo, Chowdhury *et al.* (2020) defendem que o grande número de painéis fotovoltaicos em fim de vida exigirá uma estratégia de reciclagem e recuperação, que precisa ser estabelecida até 2040.

Dessa forma, os componentes fotovoltaicos em fim de vida não devem ser tratados como resíduos, mas sim matérias-primas para o desenvolvimento de uma nova indústria baseada na reciclagem e reutilização (Biyouki *et al.*, 2024). Zubas *et al.* (2023) afirmam que fechar os ciclos dentro das etapas de produção e após a vida útil do produto possui o objetivo de reter o maior valor dos materiais de forma restaurativa, o que é uma maneira de implementar os princípios da Economia Circular (EC) dentro da indústria fotovoltaica. Portanto, a EC é proposta como uma solução potencial para os desafios de fornecimento de materiais e da gestão do fim de vida útil (Mirletz *et al.*, 2024). Práticas como o projeto, a melhoria do *design*, a redução de componentes não recicláveis, a manutenção, a extensão da vida útil, o reparo, a reutilização e a reciclagem são opções viáveis para garantir a circularidade de módulos fotovoltaicos, além da conservação de recursos e a redução do impacto ambiental (Shaw *et al.*, 2024; Al Zaabi; Ghosh, 2024).

Neste sentido, os ecossistemas circulares se destacam na literatura recente, pois exploram como as organizações colaboram para criar valor circular e permitem a coordenação entre os atores e suas atividades para implementar conjuntamente os princípios da EC (Castillo-Ospina *et al.*, 2025; Aarikka-Stenroos; Ritala; Thomas, 2021). Para Trevisan *et al.* (2021, p. 296) um ecossistema circular é um “sistema de atores interdependentes e heterogêneos que vão além das fronteiras industriais e direcionam os esforços coletivos para uma proposta de valor circular, o que proporciona oportunidades de sustentabilidade econômica e ambiental”.

Além disso, para alcançar este ecossistema é preciso mais do que interdependência operacional; é necessário um alinhamento estratégico e colaboração entre os atores em vários níveis, o que inclui estratégias, negócios, recursos e operações (Castillo-Ospina *et al.*, 2025). Um aspecto crítico dos ecossistemas circulares é a capacidade de rastrear e gerenciar recursos para garantir a disponibilidade de estoque e capital para reprocessamento (Rossi; Srai, 2024). Portanto, um ecossistema circular deve fornecer informações confiáveis sobre as características, a qualidade e os componentes dos produtos e facilitar fluxos de dados padronizados entre atores independentes para maximizar a geração de valor (Piétron; Staab; Hofmann, 2023). Por estes motivos, alguns estudos se concentram na digitalização dos ecossistemas circulares, a fim de facilitar o engajamento entre os atores do ecossistema (Sassanelli *et al.*, 2024; Yu *et al.*, 2023; Sgambaro; Chiaroni; Urbinati, 2024).

Ao considerar a problemática apresentada, surgiu a seguinte pergunta de pesquisa: “na cadeia de valor fotovoltaica, como as tecnologias digitais são utilizadas no contexto de um ecossistema circular?”. Portanto, a presente pesquisa possui como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) a fim de entender como as tecnologias digitais podem ser utilizadas para o alcance de um ecossistema circular na cadeia de valor fotovoltaica.

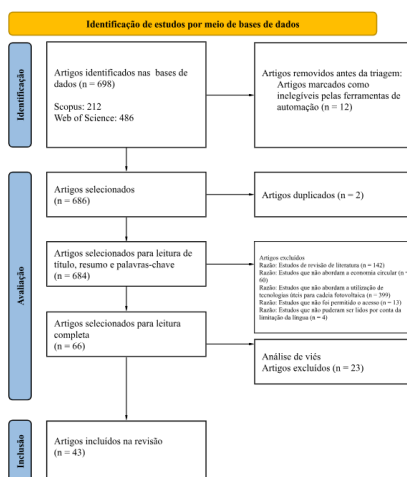
2 METODOLOGIA

Para montar o protocolo PRISMA, foi necessário montar o acrônimo de busca com base na pergunta da pesquisa, definido como PICO (*Population, Interest and Context*). Com o acrônimo, foi possível definir a *string* de busca para ser utilizada nas bases de dados Scopus e Web of Science, utilizando as seguintes palavras-chave e operadores booleanos: "photovoltaic supply chain" OR "photovoltaic value chain" OR "photovoltaic chain" OR "photovoltaic cells chain" OR "photovoltaic panels chain" AND "technological applications" OR "technology" OR "technological tools" OR "digital technologies" AND "circular ecosystem" OR "circular economy" OR "circular economy ecosystem" OR "ecosystem" OR "circularity". Com a busca nas bases, foram encontrados 212 artigos na Scopus e 486 na Web of Science.

Dos 698 artigos, 12 foram removidos por conta da impossibilidade de acesso à base de dados Scopus. Dessa forma, 686 artigos passaram pela primeira etapa de revisão, onde foram lidos o título, o resumo e as palavras-chave. Nesta primeira etapa, dois artigos estavam duplicados, 66 foram incluídos para a próxima etapa, após a aplicação de critérios de inclusão como “estudos que abordam a utilização de tecnologias digitais no contexto fotovoltaico”, enquanto 618 foram excluídos com a aplicação de critérios de exclusão como “estudos que não abordam a economia circular” e “estudos que não abordam a utilização de tecnologias digitais para a comunicação na cadeia fotovoltaica”.

Com base no proposto pelo Joanna Briggs Institute, foi adaptado um questionário de dez perguntas para a análise de viés, a fim de realizar a avaliação de qualidade dos 66 artigos selecionados após a etapa anterior. As perguntas abordam a adequação de objetivos, métodos, resultados e discussões dos artigos ao tema de ecossistemas circulares e a cadeia de valor fotovoltaica. A aplicação do questionário excluiu 23 artigos, enquanto 43 foram selecionados para inclusão na revisão. Após a execução de todas as etapas da RSL, o fluxograma do protocolo PRISMA (Figura 1) foi elaborado para visualizar o passo a passo da pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma do protocolo PRISMA



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a leitura completa dos 43 artigos selecionados, foram encontradas aplicações de diversas tecnologias digitais para a integração dos atores dentro de uma cadeia de valor. Essas tecnologias são: *Big Data (BD)*, *Blockchain*, *Cloud Computing*, *Digital Product Passport (DPP)*, *Inteligência Artificial (IA)*, *Internet of Things (IoT)* e *Tokens*.

As tecnologias mencionadas auxiliam na tomada de decisão baseada em dados, o que promove uma sintonia na comunicação e enriquece a colaboração entre as partes interessadas,

preparando o cenário para mudanças positivas na eficiência e gestão, para gerar sustentabilidade e escalabilidade na indústria fotovoltaica (Pan *et al.*, 2023). Ao abordar a integração tecnológica e o avanço das práticas de sustentabilidade, as partes interessadas podem promover uma indústria solar fotovoltaica mais robusta, apoiando a transição para uma economia de baixo carbono e atendendo às crescentes necessidades energéticas do mundo (Raji; Boudaoud; Aqil, 2024). Portanto, a partir da perspectiva das partes interessadas, é possível aplicar as metas 10R da Economia Circular na cadeia de suprimentos de energia solar fotovoltaica (Ariöz; Yılmaz; Yıldızbası, 2025).

Práticas baseadas em dados possuem um papel crítico na transição da indústria solar para soluções de energia resilientes por meio da gestão responsável de recursos (Bhandigani; Pattan; Carpitella, 2024), por isso a integração a jusante e parcerias com distribuidores e clientes importantes são essenciais para atividades a longo prazo de empresas do setor solar (Davy; Hansen; Nygaard, 2024), visto que a rastreabilidade aprimorada dos ativos significa que o uso das tecnologias contribui para um mercado fotovoltaico de segunda vida mais controlado (Boukhatmi; Nyffenegger; Grosser, 2023).

Segundo Mastrocinque *et al.* (2022) o *Big Data*, através da análise de dados, é a tecnologia com maior impacto em uma cadeia de suprimentos sustentável fotovoltaica, seguidas por tecnologias de nuvem, serviços móveis e IA. A tecnologia do BD pode ser considerada a mais adequada para a cadeia fotovoltaica por conta do Custo de Capital e dos Custos de Operação e Manutenção (Rani *et al.*, 2024).

Além disso, o *Blockchain* também pode ser implementado na indústria solar fotovoltaica para apoiar o processo de reciclagem de equipamentos fotovoltaicos, graças às suas funções como rastreabilidade, colaboração, visibilidade e confiança (Erol *et al.*, 2022). Com o *Blockchain* na cadeia fotovoltaica também é possível apoiar modelos de negócios favoráveis à Economia Circular, melhorar a agilidade e a resiliência, melhorar a relação custo-benefício e a eficiência de recursos, além de promover uma reciclagem mais eficaz e uma gestão de compras sustentáveis (Erol *et al.*, 2021).

Os parágrafos a seguir irão abordar a utilização das tecnologias apresentadas no contexto de um ecossistema circular, além de propor um *framework* de como essas tecnologias podem auxiliar na troca de informações na cadeia de valor fotovoltaica.

3.1 Aplicações das tecnologias no contexto de um ecossistema circular

Como apontado por Trevisan *et al.* (2021), a pesquisa sobre os ecossistemas circulares é, de certa forma, recente. Por este motivo, foram encontrados poucos estudos sobre este tópico. No entanto, o conceito de ecossistema tem sido abordado em contextos diversos, como na inovação e no empreendedorismo, que podem se aplicar para o contexto circular.

Portanto, Erol *et al.* (2022) afirmam que a falta de monitoramento, visibilidade, transparência, confiança, colaboração entre os elos, responsabilidade rastreável e plataformas para cooperação na cadeia de suprimentos são barreiras significativas para a adoção da EC. As tecnologias são essenciais para facilitar atividades de colaboração seguras e eficientes e processos de tomada de decisão orientados para a sustentabilidade, pois são caracterizadas pelo compartilhamento entre organizações (Ribeiro da Silva *et al.*, 2023). Dessa forma, um ecossistema possui um papel importante na transição do acesso a fundos de inovação para a cocriação de soluções da Indústria 4.0 (Basile; Tregua; Giacalone, 2024). Ademais, as relações virtuais permitem desenvolver e manter relacionamentos sólidos, nutrindo a oportunidade de exportar e comunicar valores globalmente, o que fortalece um ecossistema de inovação, permitindo a integração de habilidades e disciplinas complementares através do desenvolvimento sinérgico de todos os atores (Zamboni *et al.*, 2024).

Num ecossistema circular, as tecnologias devem dar suporte, educar e envolver as partes interessadas, pois o engajamento desses *stakeholders* facilita a adoção da tecnologia, o

que reduz os custos de circularidade (Civera; Santoro; Chiaudano, 2025). Segundo Papert *et al.* (2024), as tecnologias digitais devem fornecer serviços de informação que criem, transfiram, integrem, processem e analisem dados ao longo da cadeia de valor e compartilhem os resultados com os atores interessados. Neste sentido, as tecnologias estão fortemente envolvidas na ativação e no apoio em um ecossistema empreendedor por facilitarem funções-chave como compartilhamento de informações ou comunicação, apoiarem os participantes no desenvolvimento de competências e estarem no cerne de muitos novos empreendimentos, além de criarem valor e benefícios compartilhados para os participantes do ecossistema por meio de efeitos de rede (Rajala *et al.*, 2018; Wilson; Paschen; Pitt, 2022).

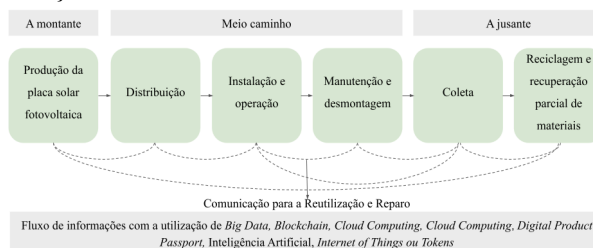
Um orquestrador deve montar o ecossistema circular e, geralmente como proprietário da plataforma, deve apresentar a tecnologia aos atores, além de ser responsável por definir os objetivos da plataforma, projetar modelos de negócios e o ecossistema inicial. (Marantes; Soares; Silva, 2023; Blackburn; Ritala; Keränen, 2023). O desenvolvimento de redes simbióticas aditivas, que contribuem para a promoção de ecossistemas circulares aditivos, ainda está em fase inicial e uma tecnologia que demonstrou ter aplicações potenciais para aprimorar o desenvolvimento dessas redes foi o *Blockchain* (Ferreira *et al.*, 2023). A curadoria adequada de dados via *Blockchain* protege as informações e facilita o fluxo de informações no ecossistema da cadeia de suprimentos, o que pode acelerar a implementação da EC (Mazumdar, 2023). Os *Digital Product Passports* também podem ser considerados produtos que geram valor sustentado por meio de ecossistemas colaborativos e bem coordenados (Jensen *et al.*, 2024).

3.2 A troca de informações na cadeia de valor fotovoltaica

Após a análise de conteúdo, foi proposto um *framework* (Figura 2) para visualizar a troca de informações, através das tecnologias apresentadas, na cadeia de valor fotovoltaica. Com base nos níveis apresentados por Garlet *et al.* (2020), é possível verificar que a utilização das tecnologias digitais permite que a comunicação entre os atores ocorra nos diferentes níveis da cadeia, representada pelas linhas tracejadas, onde ocorre a comunicação entre os atores, sem um único sentido.

A troca de informações permite uma cadeia mais integrada, onde é possível aplicar com uma maior facilidade as práticas de Economia Circular. Com as tecnologias digitais, um ator localizado no nível a montante pode visualizar se as placas solares fotovoltaicas recebem a destinação correta, assim como um instalador, no nível meio caminho, pode possuir e compartilhar informações sobre as placas para pontos de coleta, que irão distribuir as placas que serão recicladas posteriormente. Da mesma forma, placas que precisam de manutenção podem retornar ao instalador para reparos ou substituição.

Figura 2 - Troca de informações na cadeia de valor fotovoltaica



Portanto, percebe-se a importância da troca de informações na cadeia fotovoltaica, principalmente a fim de alcançar um ecossistema circular, visto que o fornecimento de informações confiáveis sobre as características, a qualidade e os componentes dos produtos e

a facilitação dos fluxos de dados padronizados entre atores independentes é essencial para maximizar a geração de valor, como afirma Piétron, Staab e Hofmann (2023).

4 CONCLUSÃO

Esta pesquisa tinha como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura a fim de entender como as tecnologias digitais podem ser utilizadas para o alcance de um ecossistema circular na cadeia de valor fotovoltaica, para responder a pergunta: “na cadeia de valor fotovoltaica, como as tecnologias digitais são utilizadas no contexto de um ecossistema circular?”. Após a leitura e análise dos artigos selecionados, foi possível perceber como as tecnologias digitais são aliadas na integração entre os atores de uma cadeia de valor, por conta da troca e da disponibilidade de informações, o que gera o fortalecimento das relações entre os atores e a garantia da implementação de práticas circulares.

Algumas limitações são referentes à seleção dos estudos para a RSL. Alguns artigos não puderam ser analisados por conta da indisponibilidade ao acesso. Esses estudos podem apresentar aplicações e práticas alternativas ao que foi apresentado nesta pesquisa. Além disso, não foi utilizado nenhum tipo de literatura cinzenta, onde é possível encontrar informação produzida por organizações governamentais, acadêmicas, empresariais e industriais, e distribuída fora dos canais de publicação convencionais. Também foram encontradas poucas pesquisas referentes a ecossistemas circulares em si, visto que é uma área emergente na literatura. Para pesquisas futuras, é recomendada a ampliação na leitura dos artigos em que não foi possível obter acesso e o estudo contínuo sobre o tema, pois é esperada a crescente publicação sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

- AARIKKA-STENROOS, Leena; RITALA, Paavo; THOMAS, Llewellyn D. W. Circular economy ecosystems: A typology, definitions, and implications. *In: Research Handbook of Sustainability Agency. [S.l.]*: Edward Elgar Publishing Ltd., 2021. p. 260–276.
- AL ZAABI, Balaqis; GHOSH, Aritra. **Managing photovoltaic Waste: Sustainable solutions and global challenges. Solar Energy** Elsevier Ltd, , 15 nov. 2024.
- AMROLLAHI BIYOUKI, Zahra *et al.* **Solar Photovoltaics Value Chain and End-of-Life Management Practices: A Systematic Literature Review. Sustainability (Switzerland)** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 ago. 2024.
- ARIÖZ, Yağmur; YILMAZ, İbrahim; YILDIZBAŞI, Abdullah. Unlocking circularity: A stakeholder theory approach to the 10Rs in the solar PV supply chain. **Renewable Energy**, v. 250, 1 set. 2025.
- BASILE, Vincenzo; TREGUA, Marco; GIACALONE, Massimiliano. A three-level view of readiness models: Statistical and managerial insights on industry 4.0. **Technology in Society**, v. 77, 1 jun. 2024.
- BHANDIGANI, Madhura; PATTAN, Akram; CARPITELLA, Silvia. Strategic Roadmap for Adopting Data-Driven Proactive Measures in Solar Logistics. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 14, n. 10, 1 maio 2024.
- BLACKBURN, Outi; RITALA, Paavo; KERÄNEN, Joonas. Digital Platforms for the Circular Economy: Exploring Meta-Organizational Orchestration Mechanisms. **Organization and Environment**, v. 36, n. 2, p. 253–281, 1 jun. 2023.
- BOUKHATMI, Ássia; NYFFENEGGER, Roger; GRÖSSER, Stefan N. Designing a digital platform to foster data-enhanced circular practices in the European solar industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 418, 2023.
- CASTILLO-OSPINA, Dánika A. *et al.* A dynamic capabilities framework for building circular ecosystems by focal firms. **Sustainable Production and Consumption**, v. 54, p. 130–148, 1 mar. 2025.
- CHOWDHURY, Md Shahariar *et al.* **An overview of solar photovoltaic panels’ end-of-life material recycling. Energy Strategy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2020.
- CIVERA, Chiara; SANTORO, Gabriele; CHIAUDANO, Valentina. Do Not Stop the Loop: Driving Circular Textiles With Technology and Stakeholder Engagement. **Business Strategy and the Environment**, v. 34, p. 5317–5335, 2025.
- DAVY, Elder; HANSEN, Ulrich E.; NYGAARD, Ivan. Localizing the solar value chain in Kenya? **Innovation and Development**, v. 14, n. 1, p. 217–240, 2024.
- EROL, Ismail *et al.* Towards a circular economy: Investigating the critical success factors for a blockchain-based solar photovoltaic energy ecosystem in Turkey. **Energy for Sustainable Development**, v. 65, p. 130–143, 1 dez. 2021.

EROL, Ismail *et al.* Alleviating the Impact of the Barriers to Circular Economy Adoption Through Blockchain: An Investigation Using an Integrated MCDM-based QFD With Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets. **Computers and Industrial Engineering**, v. 165, 1 mar. 2022.

GARLET, Tais Bisognin *et al.* Value chain in distributed generation of photovoltaic energy and factors for competitiveness: A systematic review. *Solar Energy* Elsevier Ltd, , 15 nov. 2020.

HOSEINPUR, Arman *et al.* Toward the recovery of solar silicon from end-of-life PVs by vacuum refining. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 251, 1 mar. 2023.

JENSEN, Steffen Foldager *et al.* An ecosystem orchestration framework for the design of digital product passports in a circular economy. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 7, p. 7100–7117, 1 nov. 2024.

LEE, Jackson; DUFFY, Noel; ALLEN, Jessica. **A Review of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules and the Potential for Electrochemical Recycling**. *Advanced Energy and Sustainability Research* Wiley-VCH Verlag, , 1 fev. 2025.

MARANTES, Gonçalo; SOARES, António Lucas; SILVA, Henrique Diogo. The Design of Digital Platform Ecosystem Supporting Circular Economy. In: **Springer Science and Business Media Deutschland GmbH**, 2023.

MASTROCINQUE, Ernesto *et al.* Industry 4.0 enabling sustainable supply chain development in the renewable energy sector: A multi-criteria intelligent approach. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 182, 1 set. 2022.

MAZUMDAR, Somnath. **How to Reduce Information Silos While Blockchain-ifying Recycling Focused Supply Chain Solutions?** [S.l.: S.n.].

MIRLETZ, Heather *et al.* Prioritizing circular economy strategies for sustainable PV deployment at the TW scale. **EPJ Photovoltaics**, v. 15, 2024.

PAN, Hong Yu *et al.* Empowering solar photovoltaic logistic operations through cloud-enabled blockchain technology: a sustainable approach. **Frontiers in Energy Research**, v. 11, 2023.

PAPERT, Marcel *et al.* **Towards the data-driven circular and embedded supply chain: Considerations from an ICT perspective**. [S.l.: S.n.].

PIÉTRON, Dominik; STAAB, Philipp; HOFMANN, Florian. Digital circular ecosystems: A data governance approach. **GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society**, v. 32, p. 40–46, 2023.

RAJALA, Risto *et al.* How Do Intelligent Goods Shape Closed-Loop Systems? **California Management Review**, v. 60, n. 3, p. 20–44, 1 maio 2018.

RAJI, Hajar; BOUDAUD, Abdelghani; AQIL, Mounaim. Opportunities and Challenges in the Solar PV Supply Chain: A Strategic Focus on Morocco's Energy Transition. **Solar Energy and Sustainable Development**, v. 2024, n. Special Issue, p. 121–141, 27 dez. 2024.

RANI, Pratibha *et al.* An integrated interval-valued Pythagorean fuzzy WISP approach for industry 4.0 technology assessment and digital transformation. **Annals of Operations Research**, v. 342, n. 2, p. 1235–1274, 1 nov. 2024.

RIBEIRO DA SILVA, Elias *et al.* Unleashing the circular economy in the electric vehicle battery supply chain: A case study on data sharing and blockchain potential. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 193, 2023.

ROSSI, Lisa Arianna; SRAI, Jagjit Singh. The role of digital technologies in configuring circular ecosystems. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 45, n. 4, 2025.

SASSANELLI, Claudio *et al.* **Stakeholder engagement models in digital-enabled circular manufacturing ecosystems**. *Production and Manufacturing Research* Taylor and Francis Ltd., , 2024.

SGAMBARO, Lucrezia; CHIARONI, Davide; URBINATI, Andrea. The design and servitization of products according to the circular economy principles: An ecosystem perspective in the building industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 454, 15 maio 2024.

SHAW, Stephanie L. *et al.* A circular economy roadmap for solar photovoltaics. **Solar Energy**, v. 276, 2024.

SPELLMEIER, Júlia Possebon *et al.* Design of a business model for competitive end-of-life performance of photovoltaic systems in Brazil. **Renewable Energy**, v. 245, 1 jun. 2025.

TREVISAN, Adriana Hofmann *et al.* **Unlocking the circular ecosystem concept: Evolution, current research, and future directions**. *Sustainable Production and Consumption* Elsevier B.V., 2021.

WILSON, Matthew; PASCHEN, Jeannette; PITT, Leyland. The circular economy meets artificial intelligence (AI): understanding the opportunities of AI for reverse logistics. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 33, n. 1, p. 9–25, 11 jan. 2022.

YU, Yifei *et al.* Circularity information platform for the built environment. **Automation in Construction**, v. 152, 1 ago. 2023.

ZAMBONI, Francesco *et al.* Virtual relational capital for business development: a case study. **VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems**, 2024.

ZUBAS, Aistis Rapolas *et al.* Combining circularity and environmental metrics to assess material flows of PV silicon. **EPJ Photovoltaics**, v. 14, 2023.